Henk Breman et Nico de Ridder
(sous la direction de CABO-DLO)

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens

(Table des matières)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

Auteurs :
H. Breman
J.J.M.H. Ketelaars
H. van Keulen
N. de Ridder

Collaborateurs :
Th. Rammelt (carthographie)
P.W.J. Uithol (essais, mise en page)

Traduction : M. Cuin - Furth

DLO - Centre de Recherches Agrobiologiques (CABO-DLO)
B.P. 14
6700 AA WAGENINGEN
Pays-Bas
téléphone : (0)8370-75700 -télécopie :(0)8370-23110 - télex : 75209

ACCT
13, quai A.-Citroën
75015 PARIS

CTA
Postbus 380
6700 AJ WAGENINGEN

KARTHALA
22-24, bd Arago
75013 PARIS

© Editions KARTHALA, ACCT, CABO-DLO et CTA, 1991
ISBN : 2-86537-339-8

Table des matières

- Préface

- I. La production des pâturages
  - I.1. Les pâturages naturels

    H. Breman
    - I.1.2. Gradient de climat
    - I.1.3. Climat et sol
    - I.1.4. La végétation
    - I.1.5. Les conséquences
  - I.2. La production végétale potentielle et actuelle

    N. de Ridder
    - I.2.1. Introduction
    - I.2.2. La disponibilité en eau et en éléments nutritifs
      - I.2.2.1. Bilan hydrique
      - I.2.2.2. Disponibilité en éléments nutritifs
      - I.2.2.3. Le facteur limitatif
    - I.2.3. Les caractéristiques des plantes
      - I.2.3.1. Strate herbacée
      - I.2.3.2. Espèces ligneuses
    - I.2.4. Production végétale et taux d'azote
    - I.2.5. Disponibilité fourragère
  - I.3. Elevage de la région : possibilités et limites

    J.J.M.H. Ketelaars
    - I.3.1. Introduction
    - I.3.2. Race, alimentation et couverture sanitaire
    - I.3.3. Disponibilité et qualité fourragère
      - I.3.3.1. Une première impression
      - I.3.3.2. Situation par zone climatique
    - I.3.4. La capacité de charge des pâturages
    - I.3.5. La productivité des bovins
    - I.3.6. Les systèmes d'élevage
- II. Evaluation de la production des pâturages
  - II.1. Introduction
  - II.2. Evaluation globale

    N. de Ridder & H. Breman
    - II.2.1. Introduction
    - II.2.2. Estimation de la production végétale
      - II.2.2.1. Classification en unités de paysage
      - II.2.2.2. Evaluation de la quantité d'eau infiltrée (I)
      - II.2.2.3. Estimation de la production d'arbres et d'arbustes
      - II.2.2.4. Evaluation de la production de la strate herbacée

- II.2.2.5. Plaines d'inondation et zones agricoles
- II.2.3. Disponibilité en fourrage

○ II.3. Evaluation semi-détaillée

H. Breman, N. de Ridder & H. van Keulen

- II.3.1. Introduction
- II.3.2. Carte provisoire d'unités de paysage
  - II.3.2.1. Cartographie
  - II.3.2.2. Photo-interprétation
  - II.3.2.3. Problèmes
- II.3.3. Travail sur le terrain à la fin de la saison sèche
  - II.3.3.1. Observations au niveau de l'unité
  - II.3.3.2. Choix des sites
  - II.3.3.3. Observations sur le site
- II.3.4. Estimation théorique du rendement d'azote (Nb)
- II.3.5. Travail sur le terrain à la fin de la saison des pluies
  - II.3.5.1. Vue d'ensemble des unités
  - II.3.5.2. Observations sur les sites
- II.3.6. Interprétation et application des observations
  - II.3.6.1. Approche
  - II.3.6.2. Evaluation de la composition floristique
  - II.3.6.3. Recalcul éventuel de Nb
  - II.3.6.4. Standardisation du rendement d'azote mesuré (Nm)
  - II.3.6.5. Choix entre Nb et Ns
  - II.3.6.6. Calcul de la biomasse
  - II.3.6.7. Extrapolations
- II.3.7. La carte définitive des unités de paysage ; illustrations
  - II.3.7.1. Evaluation d'une unité
  - II.3.7.2. Evaluation du trajet nord-sud

○ II.4. Evaluation détaillée

H. Breman & N. de Ridder

- II.4.1. Introduction
- II.4.2. La carte des unités de paysage
- II.4.3. Estimation théorique de la production de la strate herbacée
- II.4.4. Vérification des estimations théoriques
  - II.4.4.1. Composition de la strate herbacée
  - II.4.4.2. Composition de la strate ligneuse
  - II.4.4.3. Productivité
  - II.4.4.4. Variabilité de la production
- II.4.5. Exploitation, gestion et aménagement des pâturages

- II.4.5.1. Précision sur la qualité des pâturages
- II.4.5.2. Autres paramètres du potentiel d'exploitation
- II.4.5.3. Gestion et aménagement

- II.5. Evaluation des pâturages et production animale

J.J.M.H. Ketelaars & H. Breman

- II.5.1. Introduction
- II.5.2. Disponibilité et qualité fourragère
- II.5.3. Sélectivité et ingestion du fourrage
- II.5.4. Croissance, production laitière et reproduction
- II.5.5. Productivité des troupeaux de bovins
- II.5.6. Capacité de charge des pâturages
  - II.5.6.1. Introduction
  - II.5.6.2. Capacité de charge standard
  - II.5.6.3. Capacité de charge en fonction du système
  - II.5.6.4. Exploitation durable des pâturages

- III. Justification scientifique
  - III.1. Objet, objectif et contenu
  - III.2. La production végétale

N. de Ridder, H. van Keulen, H. Breman & P.W.J. Uithol

- III.2.1. Introduction
- III.2.2. Estimation théorique de la production de la strate herbacée
  - III.2.2.1. Production déterminée par la disponibilité en eau
  - III.2.2.2. Production déterminée par la disponibilité en éléments nutritifs
  - III.2.2.3. Observations sur l'utilisation des équations
- III.2.3. Situations s'écartant de la moyenne
- III.2.4. Coefficient de ruissellement de parcelle et de bassin
- III.2.5. Taux d'azote de la strate herbacée
- III.2.6. Concurrence entre la strate herbacée et ligneuse
  - III.2.6.1. Théorie et pratique
  - III.2.6.2. Strate ligneuse et production herbacée

  - III.3. La production animale

J.J.M.H. Ketelaars

- III.3.1. Introduction
- III.3.2. Taux d'azote et digestibilité des fourrages grossiers
- III.3.3. Ingestion de fourrage par les bovins
- III.3.4. Croissance et perte de poids en fonction de l'alimentation
- III.3.5. Production laitière
- III.3.6. Reproduction
- III.3.7. Productivité des troupeaux de bovins

- III.4. Déterminations de la capacité de charge
  H. Breman & J.J.M.H. Ketelaars
  - III.4.1. Approche
  - III.4.2. Production des pâturages et disponibilité en fourrage
    - III.4.2.1. Strate herbacée
    - III.4.2.2. Strate ligneuse
  - III.4.3. Production animale visée et capacité de charge
  - III.4.4. Production durable
    - III.4.4.1. Disponibilité en eau
    - III.4.4.2. Disponibilité en éléments nutritifs
    - III.4.4.3. Composition de la végétation
  - III.4.5. Considérations finales

- IV. Renseignements supplémentaires
  H. Breman & P.W.J. Uithol
  - IV.1. Objectifs
  - IV.2. Données concernant les plantes de pâturages
    - IV.2.1. Propriétés des espèces herbacées
    - IV.2.2. Répartition des espèces herbacées
    - IV.2.3. Aspects qualitatifs des espèces herbacées
    - IV.2.4. Espèces ligneuses
  - IV.3. Glossaire
  - IV.4. Liste des symboles et des abréviations
- Bibliographie
- ANNEXES
  - Equations courantes
    - 1. Pâturages
      - 1.1. Disponisbilité en eau
      - 1.2. Disponsibilité en azote
      - 1.3. Production des pâturages
      - 1.4. Aspects qualitatifs
    - 2. Bovins
      - 2.1. Ingestion alimentaire
      - 2.2. Changement de poids
  - Carte de paysages semi-détaillée

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens (Partie I)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

A G. Boudet,
à ses collègues et collaborateurs de l'Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, pour la mine de renseignements sur les pâturages et le bétail dans les pays sahéliens.

A N'Golo Traoré,
le vétérinaire qui a découvert que la qualité du fourrage constitue le goulet d'étranglement de l'élevage au Sahel, et qui fut l'inspirateur du Projet Production Primaire au Sahel.

A C.T. de Wit,
à ses collègues et collaborateurs du projet Production Primaire au Sahel, sans lesquels la réalisation du présent manuel n'aurait pas été possible.

Table des matières

Préface

Le présent manuel est l'aboutissement du projet de recherche néerlando-malien « Production Primaire au Sahel » (PPS). Après la publication du rapport final (Penning de Vries & Djitèye, 1982), la publication d'un manuel d'évaluation des pâturages pour les pays sahéliens, à partir des nouvelles connaissances acquises, est apparue nécessaire. Trois raisons sont à la base de cette initiative :
- Le rapport final présente un caractère trop scientifique pour nombre de techniciens qui, dans la pratique, effectuent l'évaluation des pâturages.
- Le rapport final vise davantage à élargir les connaissances des causes des différences de niveaux dans la production végétale, qu'à identifier les différences locales dans la production.
- Le rapport final n'a pas suffisamment traité tous les éléments nécessaires à l'évaluation des pâturages dans les pays sahéliens. Cela vaut notamment pour trois aspects :
  - la production limitée par la disponibilité en eau dans le nord du Sahel ;
  - la production de pâturages dans la zone soudanaise, où les graminées pérennes et les espèces ligneuses codéterminent la production, et où les pertes en eau et en éléments nutritifs par percolation ne sont pas négligeables ;

- les rapports entre la production végétale et animale.

Ce manuel, consacré exclusivement aux pâturages des pays sahéliens, a été jugé utile, compte tenu de leur spécificité. Spécificité qui limite l'utilisation de certaines méthodes exposées par exemple dans « Guidelines: land evaluation for extensive farming » de la FAO (1987). En comparaison avec le manuel de Boudet (1978), lui aussi conçu spécialement pour la région, on assiste à un développement de l'ensemble des méthodes sur la base de connaissances nouvelles :
- Les méthodes sont en partie spécifiques à la situation. Pour le nord du Sahel et pour les régions plus au sud à fort ruissellement, régions où la production est limitée par la disponibilité en eau, l'approche proposée est différente de celle pour le sud du Sahel et la savane, où les éléments nutritifs limitent la croissance. L'appréciation est différente suivant que dominent les espèces annuelles ou les graminées pérennes ; les conséquences positives et négatives de la présence d'arbres et d'arbustes ont été prises en compte.
- La prise en compte de la dynamique de la végétation revêt une importance cruciale dans la méthode d'évaluation proposée. Les procédures de standardisation permettent d'atténuer le fait que l'année d'observation ne correspond jamais à une année moyenne.
- Il a été consacré au moins autant d'importance à la qualité du fourrage qu'à sa production. Les rapports entre la qualité et l'ingestion de fourrage par le bétail n'ont pas été omis.
- Les caractéristiques de production pour les animaux individuels ont été déduites de la qualité du fourrage ingéré. La productivité des troupeaux est déduite de la production des animaux pris individuellement.

Ce manuel peut donc être considéré comme la suite du rapport final du projet PPS. Bien que destiné surtout aux pays sahéliens, une partie des méthodes pourra être appliquée ailleurs après ajustement, dans des régions (semi-)arides, à condition que les espèces annuelles y dominent. Tout comme dans le rapport final du PPS, les utilisations de simulations et d'analyses de système ont été fréquentes. Elles constituent un moyen efficace pour faire la synthèse des connaissances existantes et les relier dans un rapport logique, afin de permettre leur utilisation pour l'extrapolation et les prévisions. Les modèles complexes n'ont cependant pas été utilisés tels quels dans le manuel, par contre, ils ont servi au calcul de rapports « simples » sous forme d'équations, de graphiques ou de tableaux, qui eux ont été utilisés. Le choix a porté sur ces rapports établis par le calcul plutôt que sur des rapports empiriques, compte tenu du caractère local et saisonnier de ces derniers et de leur faible contribution à la compréhension en la matière.

Le présent manuel se compose de quatre parties, dont chacune s'adresse à un groupe cible différent. Le manuel dans le sens le plus restreint se compose de la partie II et est destiné aux techniciens et chercheurs, qui ont pour tâche de déterminer la production végétale des pâturages naturels, d'identifier les facteurs limitatifs à la base de cette production, de déterminer les possibilités pour la production animale, de suivre l'évolution des pâturages au cours du temps et de proposer des interventions pour l'augmentation de la production. Des exemples sont intégrés à la présentation systématique des méthodes, favorisant ainsi le transfert de connaissances. Dans cette partie peu ou pas d'attention est accordée à des sujets pour lesquels il existe des méthodes plus ou moins courantes, telles que l'échantillonnage du pâturage ou l'interprétation des photos aériennes.

L'objectif de ce manuel n'est nullement la présentation d'une méthode d'évaluation des terres, mais la mise à disposition d'un outil pouvant être utilisé dans le cadre des méthodes existantes telles que celles de la FAO (1987), lorsque le potentiel de production des unités de paysage doit être évalué. Le potentiel de production est tout d'abord caractérisé par le niveau de la production végétale. Dans la mesure où la biomasse végétale ne constitue qu'un produit intermédiaire de l'élevage, une conversion vers la production animale s'impose. C'est la raison pour laquelle, dans le présent manuel, on a tenté de répondre à la question suivante : « Quelle est la contribution possible d'une unité de paysage donnée, à la production animale, et particulier à la production bovine ?». La question de savoir si cette contribution est grande ou petite, essentielle ou non, ne peut recevoir de réponse que dans un contexte géographique et socio-économique donné.

La production animale est dérivée de la situation fourragère d'une manière peu conventionnelle. On ne voudrait certainement pas suggérer cependant de supprimer les manuels spécialisés existants, comme celui de Rivière (1978). Il faut s'adresser à de pareils manuels pour des situations où les cultures fourragères et l'achat des aliments forment la base de l'élevage. La méthode présentée ici n'est suggérée pour faire la liaison entre la situation fourragère et la production animale que dans le cas où cette situation est déterminée en grande partie par la production variable (qualitativement et quantitativement) des pâturages concernés. Des analyses bromatologiques continues et chères ne seront pas à conseiller dans ce cas.

Dans la région, la planification du développement rural est souvent basée sur une surestimation de la potentialité des ressources naturelles (van Keulen & Breman, 1990 ; Breman *et al.*, 1990). Aussi, la méthode présentée dans la partie II a été utilisée pour une évaluation globale des pâturages dans les pays sahéliens, afin de donner ainsi une vision plus réaliste de leurs possibilités de production. Les résultats de cette évaluation sont présentés dans la partie I , parallèlement à un exposé sur le caractère spécifique de ces pâturages. Cette partie est destinée aux dirigeants des pays sahéliens, des pays donateurs et des organisations donatrices, aux responsables des programmes de développement rural, etc. Cette partie peut également être utilisée à titre de vérification des exercices éventuels destinés à vérifier la maîtrise des méthodes proposées. Il ne faut pas perdre de vue dans ce cas, que les résultats présentés ont été arrondis pour ne pas suggérer une trop grande précision.

La partie III est consacrée à la justification scientifique de la méthode présentée dans la partie II . Les méthodes ainsi que les valeurs numériques choisies pour les paramètres, y sont étayées, pour autant que le rapport final PPS ou d'autres publications aisément abordables ne s'en soient déjà chargées. Il n'est pas possible dans la partie II, de fournir des solutions pour couvrir toutes les éventualités, mais les techniciens ayant reçu une instruction scientifique et les chercheurs sauront éventuellement adapter les méthodes de la partie II grâce aux informations de la partie III . La partie III représente en quelque sorte l'état des connaissances par rapport aux recherches sur les pâturages concernés.

La partie IV dispense des informations pouvant faciliter l'utilisation de la partie II :
- récapitulation des caractéristiques des espèces végétales, décisives pour la production et/ou la qualité des pâturages et pour la dynamique de la végétation ;

- glossaire des concepts utilisés ;
- récapitulation des symboles et abréviations utilisés.

Le glossaire et la liste des symboles et abréviations peuvent parfois être utiles pour les parties I et III. Pour les utilisateurs maliens, la carte en annexe présente un intérêt allant au-delà de l'illustration. Elle constitue la base du suivi de l'évolution des pâturages dans le temps (Breman & Diarra, 1991).

L'annexe comporte :
- un dépliant avec la récapitulation des équations pouvant être utiles lors de l'estimation ;
- la carte utilisée comme exemple dans le processus de l'évaluation.

La conception et la publication du présent manuel a été rendue possible grâce au financement commun de la Direction Générale de la Coopération Internationale du ministère néerlandais des Affaires étrangères (DGIS, La Haye) et du Centre de Recherches Agrobiologiques (CABO-DLO, Wageningen). Ont contribué entre autres à la publication : le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA, Ede), l'Agence de Coopération Culturelle et Technique (ACCT, Paris) et le Club du Sahel (OCDE, Paris).

De nombreux contacts ayant permis de (faire) tester la valeur utilitaire des concepts et éventuellement leur ajustement, ont été très précieux. Il s'agit de contacts avec le projet « Amélioration des pâturages et de la production animale en Mauretanie » (APPAM, Kankossa), le Département de Recherche des Systèmes de Production Rurale - Volet Fonsébougou (DRSPR, Sikasso, Mali), le Club du Sahel (Paris), et le Comité Interétat de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS, Ouagadougou, Burkina Faso).

Ce manuel résulte principalement du travail des quatre auteurs et de deux de leurs collaborateurs. L'apport spécifique de chacun ne peut être indiqué que globalement. Les deux personnes ayant assuré la rédaction finale étaient notamment responsables des questions concernant la production végétale et l'écologie. Jan Ketelaars s'est chargé des relations entre la production animale et la production végétale. Herman van Keulen s'est concentré sur le développement des modèles et de leur utilisation, il a par ailleurs participé à la rédaction. Peter Uithol a contribué à nombre d'études de base, il a réalisé les nombreuses simulations et a été responsable de la composition et de la mise au point définitive des textes. Les cartes ont été établies par Theo Rammelt.

De nombreuses personnes ont contribué indirectement à la réalisation de ce manuel. Il s'agit en premier lieu des anciens collaborateurs du projet PPS. Nous tenons à mentionner tout particulièrement L. Stroosnijder, un des inspirateurs qui n'a pu contribuer à la réalisation finale à cause de ses nombreuses responsabilités. L'étude approfondie de la dynamique des pâturages de A.M. Cissé a été d'une grande importance, tout comme la mise à disposition de données non encore publiées concernant la production d'espèces ligneuses par F.W.T. Penning de Vries.

F. Dekker et J.J. Kessler, J.W. Menke et F.M.J. Ohler ont contribué aux études partielles. Les étudiants M.P.T. Alers, F. Dekker, A. van Engelen, J.J. Kessler, F. van der Laan, J.J. van der Lek, S. Lievens et H.

Snijders ont participé aux travaux.

Le manuel ne traite pas en détail de leurs études, mais il s'y réfère. Une étude importante concerne le rôle des arbres et des arbustes dans l'écosystème agricole du Sahel et de la zone soudanaise (Kessler & Breman, en préparation). Cette étude n'a pas encore été publiée, aussi il n'y est pas fait référence malgré son utilisation très fréquente. Toutes les données concernant les espèces ligneuses, utilisées sans référence, proviennent de cette étude. Un avant-projet de cette étude est disponible (Breman *et al*., 1984) ainsi qu'une synthèse (Kessler & Breman, 1990).

Les auteurs du présent ouvrage expriment également leur reconnaissance à tous ceux qui, au cours des années, ont accepté d'être partenaire de discussion ou qui ont commenté les textes provisoires. Il s'agit tout particulièrement des collaborateurs du CIPEA (L. Diarra, P. Hiernaux et P.N. de Leeuw), des collaborateurs de l'ITC (H. van Gils, S. Groten, W. van Wijngaarden et I.S. Zonneveld) et du service de la protection de la nature de la LUW (S. de Bie et Chr. Geerling) ainsi que de W.M.L. Berckmoes, P. Esselink, S. Leloup, L. 't Mannetje et M. Traoré.

La dactylographie a été en grande partie effectuée par les collaboratrices de la section traitement de texte du CABO-DLO ; J. Engelsman a contribué à la réalisation des dessins. La traduction du néerlandais au français a été assurée par M. Cuin-Furth.

Henk Breman
Nico de Ridder

Partie I

La production des pâturages

I.1. Les pâturages naturels

I.1.1. Uniques en leur genre

Lorsqu'il s'agit d'évaluer la situation et les potentialités d'une région déterminée, il est tentant de se référer à des régions plus ou moins analogues. Cette méthode de travail comporte cependant le risque de négliger trop aisément des différences fondamentales.

Les manuels traitant de l'évaluation des pâturages trouvent notamment leur origine dans l'évolution parallèle de la gestion et de l'étude des pâturages naturels aux USA. D'une manière générale, le point de départ est constitué par un climax dominé par des graminées pérennes (voir par exemple Stoddard et al.,

1975). Dans ce cas, on suppose que la pâture entraîne des perturbations liées à son intensité, qui ne sont pas en principe irréversibles. Les végétations annuelles sont considérées comme étant surpâturées (Westoby, 1980).

Walker (1985) appelle à la prudence (surtout pour les régions semi-arides) quant à l'existence d'un équilibre simple, explicable avec les connaissances actuelles, entre la végétation et la pâture ; les facteurs de probabilité jouent ici un trop grand rôle. Westoby (1980) souligne que dans les pâturages naturels semi-arides du centre de la Californie, dans les pays méditerranéens et dans le nord de l'Australie, certaines végétations sont à dominante d'espèces annuelles même en l'absence de pâture. Westoby explique cet état de choses par deux mécanismes :
- Le sol et le climat permettent l'évolution de la végétation vers un climax de graminées pérennes, mais les espèces annuelles et leurs semences empêchent la germination ou l'implantation de graminées pérennes (compétition asymétrique). Les graminées pérennes, disparues par suite de sécheresse ou de surpâturage, ont alors beaucoup de mal à se réimplanter.
- Les espèces annuelles sont très compétitives dans les climats semi-arides comportant une saison de croissance fiable et une sécheresse extrême pendant le reste de l'année.

Dans leur ouvrage, Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 79, 130, 285 et 291) présentent le Sahel comme une région où dominent principalement les végétations annuelles. Les graminées pérennes occupaient une place plus importante avant la sécheresse du début des années 70, mais même aux endroits sans pâture important, la sécheresse a eu pour ces espèces un effet catastrophique. Par ailleurs, la présence de graminées pérennes dans la végétation du Sahel, semble liée au degré de répartition hétérogène de l'eau de pluie sous l'influence du substrat ; leur importance augmente en fonction des infiltrations d'eau hors de portée des racines des espèces annuelles. En tenant compte du climat du Sahel, il semble donc bien que le deuxième mécanisme s'applique à cette région.

Ceci ne signifie pas que la surexploitation, éventuellement en combinaison avec le premier mécanisme, ne constitue pas un facteur important pour la dominance des espèces annuelles. Il semble même probable, que les graminées pérennes deviennent de plus en plus sensibles à la surexploitation, au fur et à mesure que d'autres facteurs écologiques rendent les espèces annuelles plus compétitives.

Les explications qui suivent rendent plausible l'hypothèse selon laquelle les spécificités de la région sahélienne par rapport à d'autres régions à dominance d'espèces annuelles, proviennent de la manière extrême dont le sol et le climat avantagent ce type de végétation.

Le caractère dynamique de nombreuses végétations sahéliennes et la faible importance des espèces ligneuses, constituent des indications quant à ces différences par rapport à ces autres régions.

Le caractère unique du Sahel s'impose en comparant le climat et le sol du gradient d'Afrique occidentale, - allant du désert torride subtropical à tropical (Sahara), en passant par les tropiques semi-arides (Sahel), jusqu'à la savane tropicale continentale (savane soudanaise) - avec des gradients identiques en d'autres endroits du globe, présentant une certaine similitude en matière de pluviosité.

Ensuite seront brièvement traités les conséquences qui en découlent pour la végétation, leur signification pour l'évaluation, la gestion et l'utilisation des pâturages naturels tout comme leur régénération et amélioration.

I.1.2. Gradient de climat

La position des continents par rapport à l'équateur, aux courants marins et par rapport les uns aux autres, forme la base de la présence de huit grands complexes désertiques sur la terre.

Lorsque l'on s'éloigne de ces centres d'aridité, les climats traversés engendrent une disponibilité croissante en eau. En quatre endroits, il existe une certaine conformité avec le gradient d'Afrique occidentale. Depuis le grand désert occidental (USA, Mexique) vers le sud, depuis le Thor indien vers le sud-est, depuis le Kalahari vers le nord en passant par l'Angola, et depuis le grand désert Victoria (Australie centrale) vers le nord, la pluviosité augmente sous des climats tropicaux chauds.

Une comparaison plus précise de ces gradients, sur la base de la classification climatique de Papadakis (1975), élimine les gradients d'Amérique du Nord et de l'Angola. Les transitions y sont plus brusques et les températures y sont légèrement inférieures pour l'Angola et fortement inférieures pour l'Amérique du Nord. La présence de montagnes en constitue une cause importante.

Bien qu'il existe dans le nord-ouest de l'Inde, une petite région avec les mêmes transitions climatiques que dans les pays sahéliens, les différences même vues superficiellement, sont grandes. La proximité de la mer et l'éloignement relative de l'équateur, rendent la moyenne des températures moins extrêmes ; les températures sont moins élevées de 5 à 10 deg.C au mois de janvier, et de 0 à 5 deg.C au mois de juillet.

En Australie, ce n'est que le long de la côte, de l'extrême ouest vers le nord-est, que l'on trouve une série de climats correspondant à ceux de l'Afrique occidentale (carte I.1). Un climat continental semi-tropical sépare cependant la plus grande partie du désert subtropical australien des tropiques semi-arides et de la savane tropicale continentale. Dans l'Australie tropicale, pour une pluviométrie égale, les températures sont généralement moins élevées, alors que la pluie est moins liée aux saisons au fur et à mesure de la croissance de l'aridité. C'est une des raisons pour laquelle l'évapotranspiration potentielle en Afrique occidentale présente pour de vastes régions des valeurs qui sont au moins plus élevées de 1000 mm/an. Même pour 1400 mm de pluie par an, dans la savane de Guinée de l'Afrique occidentale, l'évapotranspiration potentielle de presque 2200 mm/an dépasse de 450 mm celle de l'extrême nord de l'Australie, et ce pour une pluviosité identique (carte I.2). La fiabilité de la saison de croissance dans l'Australie tropicale est beaucoup moins élevée que dans l'Afrique occidentale pour une pluviosité totale identique (Nix, 1983).

Les zones sahélienne et soudanaise d'Afrique occidentale présente donc un modèle climatique unique, caractérisé :
- par un gradient de pluviosité de 100 à 1200 mm en présence de températures très élevées pendant

l'année entière ;
- des pluies estivales fortement liées à la saison.

On constate par ailleurs une grande homogénéité sur une région très étendue, avec seulement localement une influence modératrice de la mer, des montagnes et des plaines d'inondation.

Carte I.1
Situation des régions arides en Afrique de l'Ouest et en Australie.

Carte I.2
Comparaison des climats du Sahel et de l'Australie.
Selon Papadakis, 1975.

I.1.3. Climat et sol

L'Afrique occidentale présente donc une seule courte saison de croissance par an, le mois d'août étant le mois principal. Les distributions d'eau de pluie et les caractéristiques des sols les plus courants, occasionnent des transitions relativement brusques au début et à la fin de la saison de croissance.

Dans la partie la plus sèche de cette région, dominent des sols sablonneux (souvent profonds) qui, surtout au début de la saison des pluies, ne sont humidifiés que superficiellement et l'eau infiltrée disparaît rapidement par évaporation. Plus au sud, ce sont des sols limoneux qui dominent, vite compactés superficiellement et souvent peu profonds, ce qui fait que leur capacité de stockage d'eau est réduite. L'eau de ruissellement et de drainage se concentre localement sur les plaines d'inondation, entraînant à ces endroits une saison de croissance distincte qui sera plus longue et se terminera moins brutalement.

Outre l'influence modificatrice du sol sur la disponibilité en eau découlant des pluies, la fertilité du sol a son importance pour le caractère et la productivité des pâturages. Le gradient aride/eutrophe vers humide/distrophe (Huntley, 1982), assez courant sous les tropiques à cause de l'interaction de la pluviosité et du sol, est peu prononcé en Afrique occidentale. C'est la prépondérance de sols sablonneux pauvres dans la partie sèche du trajet qui en est la cause. Il est ainsi question d'un gradient de disponibilité en eau pour une disponibilité basse et plus ou moins uniforme en éléments nutritifs (I.2.2.3). Le manque d'éléments nutritifs dans la partie humide du trajet, est cependant moins prononcé que dans la savane latino-américaine, où les taux élevés d'oxydes Al et Fe entraînent entre autres une très faible disponibilité en P, ainsi que dans l'Australie tropicale (Walker, 1985).

La fertilité du sol, extrêmement faible, entraîne par exemple dans la partie tropicale du Venezuela, l'existence de savanes alors que les mêmes pluies engendreraient ailleurs des forêts tropicales humides. L'Afrique occidentale présente également des savanes très humides. Celles-ci sont cependant ou bien crées par l'homme (agriculture et feux-brûlage), ou bien liées aux pluies concentrées en une seule saison (autour de 0deg. longitude ouest ; Hopkins, 1965).

I.1.4. La végétation

Les caractéristiques que Johnson et Tothill (1985) attribuent aux savanes (définies par eux comme étant les zones ayant une pluviosité de 375 à 1500 mm) couvrent assurément la majorité des pâturages des pays sahéliens : végétations caractérisées par une strate herbacée continue, dominée par des graminées, entrecoupée ici et là d'arbres ou de buissons. Les étés sont humides, chauds à très chauds, les hivers sont secs, chauds à frais. Dans la zone ayant des précipitations annuelles de 750 à 1500 mm, apparaissent notamment des Andropogonoïdées. Lorsque les savanes deviennent plus humides, que ce soit à la suite d'une pluviosité plus importante, d'une capacité d'infiltration plus faible ou d'inondations, les Panicoïdées prennent également de l'importance, alors que dans le cas d'humidité permanente ce sont les Oryzoïdées qui dominent. Des Aristoïdées et Eragrostoïdées apparaissent en-dessous de 750 mm de précipitations. Elles prédominent tout d'abord sur les sols peu profonds et sablonneux.

Selon Johnson et Tothill, les savanes avec Pennisetum et Panicum, résultant de forêts toujours vertes, sont typiques de la fin humide du gradient d'Afrique occidentale. La dominance possible d'une espèce de Cenchrus, une Panicoïdée, dans la partie semi-aride du gradient, constitue une particularité. Dans la savane sèche de l'Inde également, une espèce de Cenchrus a son importance. Il s'agit là cependant, contrairement à l'Afrique occidentale, d'une espèce vivace. Sous les tropiques secs australiens, ce Cenchrus vivace n'existait pas, mais elle s'est étendue et installée très rapidement après avoir été introduite par l'homme.

Pour expliquer la prédominance des espèces annuelles, il faut prendre en compte la concurrence entre les espèces pour l'obtention d'éléments nutritifs, d'eau et de lumière, tout en tenant compte de l'effet des sécheresses, de la pâture et des feux, dans leurs effets directs et indirects, ces derniers surtout pour l'influence à travers le substrat.

Une particularité importante pour les climats du Sahel et de la savane soudanaise d'Afrique occidentale, est le fait que sur de vastes régions, les isohyètes sont approximativement parallèles aux degrés de latitude qui déterminent la longueur du jour. Les espèces annuelles y possèdent une longueur de cycle sensible à la photopériode, lié à la disponibilité moyenne en eau à une latitude donnée. Notamment sur les substrats sablonneux abondants, les espèces annuelles et les graminées pérennes se concurrencent pour les mêmes éléments nutritifs et la même eau. D'une manière générale, il subsiste de l'eau après l'achèvement du cycle des espèces annuelles, à cause de la sensibilité à la longueur du jour. Par ailleurs, la carence en éléments nutritifs restreint la croissance encore plus fortement que la disponibilité en eau, ce qui fait que toute l'eau n'est pas utilisée par les espèces annuelles dans le sud du Sahel et dans la savane, ni même dans le Sahel du nord, dans les dépressions où se sont concentrés les écoulements. Les graminées pérennes peuvent en principe profiter de l'eau résiduelle, en restant actives pendant une partie de la longue saison sèche et en réduisant ainsi la période problématique. Elles évacuent alors des feuilles une partie des éléments nutritifs absorbés pendant la période des pluies, et les stockent dans les racines ou le bois. Elles renforcent ainsi petit à petit leur position de concurrence par rapport aux espèces annuelles.

Pendant les années de sécheresse, notamment après une période à pluviosité au-dessus de la moyenne, cet avantage est annulé. La disponibilité en eau est alors tellement basse que toute l'eau disponible est utilisée par les espèces annuelles - avec leur longueur de cycle relativement long pour ces années -, et il s'ensuit la mort des graminées, des arbres et des arbustes vivaces. Lorsque la sécheresse persiste, il est vrai que les espèces annuelles à cycle relativement long se retirent vers le sud, pour être remplacés par des espèces à cycle plus court, mais les végétations de transition sont dominées par des espèces rudérales, qui poursuivront leur croissance tant qu'il y a de l'eau disponible (Breman et al., 1980).

La pâture renforce, de deux manières au moins, la position esquissée des espèces annuelles. D'une part la période de croissance se raccourcit encore, sous l'influence de pertes d'eau croissantes dues au compactage superficiel du sol. D'autre part, les espèces vivaces sont pénalisées sélectivement aux moments qui pourraient les avantager : pâture pendant la période de pluies irrégulières précédant la pleine saison de croissance, au moment où elles pourraient prendre l'avantage sur les espèces annuelles, et au début de la période sèche, lorsqu'elles forment des réserves d'éléments nutritifs.

Une fois les populations d'espèces vivaces décimées ou disparues, leur retour est très malaisé. La production de semences est relativement faible, les mécanismes de transport des semences sont orientés principalement du nord vers le sud (l'harmattan, sens dominant du vent, et les déplacements du bétail pendant la saison sèche), et les plantules ne possèdent pas l'avantage compétitif des plantes adultes par rapport aux espèces annuelles (premier mécanisme, I.1.1).

Dans le groupe des espèces annuelles, les graminées à germination rapide et mécanisme de photosynthèse C4 représentent les espèces dominantes. Les perturbations avantagent les plantes à germination lente, parmi lesquelles les dicotylédones sont nombreuses. Les dicotylédones peuvent également présenter un mécanisme de photosynthèse C3, on les rencontre à côté des espèces C_4 dans des situations où les températures pendant la saison de croissance ne sont pas trop extrêmes :
- là où les pluies fréquentes modèrent la température ;
- sous les espèces ligneuses donnant de l'ombre, donc notamment dans la savane.

Les espèces spécifiques seront mentionnées dans la partie IV.

Les processus sur lesquels est basée cette dynamique de la végétation sont traités en détails dans d'autres ouvrages (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 98-132 ; Breman et al., 1980 et 1984 ; Cissé, 1986). Ces ouvrages font apparaître que les végétations annuelles qui résultent du surpâturage, peuvent être distinguées de celles qui sont liées à une saison de croissance courte mais fiable dans un climat chaud semi-aride (deuxième mécanisme, I.1.1), grâce à une prédominance d'espèces à germination relativement lente et à faible vitesse de croissance. Les végétations dominées par des espèces à germination rapide, telles qu'elles sont décrites ci-dessus, existent notamment dans le Sahel. Les probabilités d'existence de graminées pérennes formant une composante stable de la végétation, augmentent lorsqu'elles disposent d'une réserve d'eau difficilement accessible aux espèces annuelles, lorsque la période sans pluie est suffisamment brève et que l'aridité diminue (évapotranspiration

potentielle décroissante). Cet état de choses se présente de plus en plus fréquemment dans la savane, au fur et à mesure de la progression vers le sud. Le premier cas peut également se présenter au Sahel, sur les sols profonds à capacité de stockage d'eau très faible, sur les sols avec une répartition fortement hétérogène de l'eau de pluie de par le ruissellement et la concentration des écoulements, et sur les plaines d'inondation. Dans ce cas, la disponibilité en eau est suffisante pour que les espèces vivaces puissent engager effectivement une concurrence pour l'obtention d'éléments nutritifs avec les espèces annuelles.

Le développement des espèces ligneuses dans la région, peut être compris jusqu'à un certain point, à partir du moment où on les considère comme des espèces vivaces par excellence, avec tous les avantages et inconvénients que cela suppose. Par rapport aux graminées vivaces, elles sont plus exigeantes en matière de disponibilité en eau, elles s'établissent plus difficilement, mais une fois établies, elles forment une composante plus stable de la végétation.

Les espèces ligneuses présentent un désavantage spécifique par rapport aux graminées vivaces : la plus grande sensibilité aux feux, notamment dans le stade juvénile. Par contre, elles conviennent moins comme fourrage, notamment au stade adulte. Il s'ensuit que dans certaines conditions, la pâture constitue l'élément décisif qui tranchera en faveur des espèces ligneuses, par rapport à la strate herbacée, pour ce qui concerne l'obtention d'eau et d'éléments nutritifs, par rapport à la strate herbacée. Et ceci vaut même dans les cas où en l'absence de pâture, les espèces ligneuses sont pratiquement sans importance, comme dans le nord du Sahel (Kessler & Breman, en préparation).

Dans les pays sahéliens, les avantages dont jouissent les espèces annuelles par rapport aux espèces vivaces, sont encore accentués indirectement, par la combinaison climat/sol dépeinte ci-dessus. La culture de céréales, dans ce cas de graminées annuelles C4, y est relativement aisée, alors que l'élevage est problématique (longue période de sécheresse, peu d'espèces vivaces). L'agriculture, la densité de population relativement élevée qui en résulte partiellement ainsi que l'abattage des arbres et les feux qui vont de pair, exercent une influence très négative sur le bois sur pied.

En l'absence d'agriculture, les espèces ligneuses dans la savane semi-humide peuvent, compte tenu des disponibilités en eau, monopoliser suffisamment d'éléments nutritifs pour dominer la strate herbacée, et ce par concurrence pour la lumière. Même avec le recouvrement actuel, elles interceptent suffisamment de lumière à partir d'une pluviosité de 800 mm par an, pour que les espèces C_3 de la strate herbacée ne puissent plus croître de manière potentielle, et ceci vaut davantage encore pour les espèces C_4 (Kessler & Breman, en préparation).

I.1.5. Les conséquences

La prédominance naturelle des espèces annuelles entraîne des conséquences importantes :
- Les évaluations des pâturages doivent tenir compte d'une grande variabilité d'une année sur l'autre. La composition des espèces peut se modifier très rapidement. La biomasse produite annuellement, variera très fortement, puisque les éléments nutritifs nécessaires pour les espèces annuelles sont prélevés presque exclusivement à partir du sol, alors que pour les espèces vivaces, ils proviennent pour une large

part de leur propre réserve. Pour les espèces annuelles, la disponibilité dépend, entre autres, de la forte variabilité de la durée et de la profondeur de l'humidification du sol (III.2.3).

- L'intérêt que représentent les graminées vivaces et les espèces ligneuses pour l'entretien du bétail pendant la longue période de sécheresse, exige pour ces espèces une attention plus que proportionnelle à leur contribution à la production primaire.Il sera nécessaire d'appliquer des critères pour la capacité de charge qui, pour les aspects biotiques, ne seront pas uniquement basés sur la sensibilité des espèces vivaces face à la pâture. L'élément principal de ce dernier critère est la capacité des espèces vivaces à maintenir leurs réserves d'éléments nutritifs (Stoddard et al., 1975). Pour les espèces annuelles, c'est la production des semences et les conditions de germination et d'installation qui sont déterminantes.
- Ce qui précède signifie également que la gestion des pâturages et leur utilisation devront diverger : les rotations conçues pour l'exploitation optimale des espèces vivaces ne conviennent pas obligatoirement de façon optimale pour les espèces annuelles ; les arguments en faveur de l'utilisation des feux pour l'exploitation des espèces vivaces ne sont pas valables pour les espèces annuelles.
- Il faudra développer des techniques spécifiques aux diverses régions pour la régénération ou l'amélioration des pâturages. Ceci vaut par exemple pour la lutte contre la désertification (Breman, 1987) et pour l'introduction des légumineuses (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 439 ; Breman & Traoré, 1987).

Lors de la réintroduction des graminées vivaces, il ne faudra pas seulement tenir compte du phénomène du surpâturage comme cause de leur disparition, mais également des influences du climat.

I.2. La production végétale potentielle et actuelle

I.2.1. Introduction

En plus de l'énergie solaire et du dioxyde de carbone, les plantes ont besoin d'eau et d'éléments inorganiques pour la production de combinaisons organiques. La croissance sera optimale, lorsque pendant tout le cycle de croissance, l'offre en eau, en lumière et en éléments nutritifs est suffisante pour répondre à la demande des plantes. Dans ces conditions, la production est déterminée par les caractéristiques physiologiques des espèces végétales composant la végétation et par les conditions atmosphériques ; la température et le rayonnement en constituent les facteurs principaux. La production ainsi obtenue, définie comme étant la production potentielle, est le produit de la durée du cycle de croissance - déterminé par les caractéristiques des plantes et la température (et éventuellement la durée du jour) - avec la vitesse de croissance, déterminée par les caractéristiques des plantes et le niveau du rayonnement. Dans des conditions naturelles, cette production potentielle se présentera rarement ; dans les systèmes agraires, cette situation peut se présenter sur les champs irrigués, pourvus de manière optimale en engrais chimiques, et dans les serres.

Dans les conditions naturelles, où la disponibilité en eau et en éléments nutritifs dépend des conditions atmosphériques et des propriétés du sol, des conditions sous-optimales apparaîtront régulièrement. La production actuelle sera alors considérablement plus faible que la production potentielle. La production actuelle dépend en outre des propriétés des espèces végétales de la végétation, qui déterminent si ces

conditions sous-optimales seront exploitées et dans quelle mesure.

Il importe de déterminer si le niveau de la production végétale actuelle des pâturages naturels est déterminée par le rayonnement ou par la disponibilité limitée en eau ou en un ou plusieurs éléments nutritifs. Tout d'abord, parce que la quantification du facteur le plus limitatif offre la possibilité d'une première estimation de la production végétale possible dans des conditions naturelles. En outre, la disponibilité relative en eau et en éléments nutritifs en combinaison avec les propriétés des espèces d'une végétation, déterminent la qualité de matière produite en termes de fourrage pour les ruminants. Et finalement, l'identification du facteur le plus limitatif circonscrit les interventions pouvant avoir un effet, et détermine quelles sont les opérations les plus adaptées à augmenter la production actuelle dans des situations spécifiques.

A première vue la disponibilité en eau semble le facteur le plus limitatif de la production végétale des pâturages naturels dans les régions arides et semi-arides. Cela est vrai en ce qui concerne la durée possible de la saison de croissance. Pendant la saison sèche, la croissance végétale est rendue impossible par manque d'eau, mais Penning de Vries & Djitèye (1982) démontrent dans leur ouvrage, qu'au cours de la saison des pluies, la vitesse de croissance de la végétation est souvent limitée par l'offre en éléments nutritifs, tels que l'azote et le phosphore. En outre, cette étude a été une mine d'informations en ce qui concerne les caractéristiques importantes d'espèces présentes dans la végétation. C'est pourquoi ce chapitre se basera sur les résultats de cette vaste étude, pour caractériser la production actuelle des pâturages naturels dans les régions arides et semi-arides de l'Afrique occidentale. L'accent sera mis sur les aspects quantitatifs et qualitatifs de la production végétale (suite de ce chapitre) et de ses conséquences pour la production animale (I.3).

I.2.2. La disponibilité en eau et en éléments nutritifs

I.2.2.1. Bilan hydrique

La disponibilité en eau dans le sol pour les plantes, est la résultante d'un certain nombre de processus, résumés dans l'appellation bilan hydrique (figure I.1).

Dans les pays sahéliens, la source principale d'eau est constituée par les précipitations ; les herbes vivaces à racines profondes et les espèces ligneuses peuvent également, notamment dans la savane, exploiter la nappe phréatique. Localement, les rivières peuvent aussi constituer la source d'eau principale pour la végétation (par exemple le Delta du Mali et le lac Tchad).

Figure I.1
Bilan hydrique lié aux processus qui influencent la disponibilité en eau pour la croissance des plantes.

Les précipitations moyennes annuelles dans les pays sahéliens augmentent, du nord au sud (carte I.3). Les précipitations se limitent à l'été et sont concentrées en l'espace de quelques mois : moins de 2 mois pour les précipitations moyennes ne dépassant pas 250 mm/an ; 2 à 3 mois pour les précipitations

moyennes de 500 mm/an et plus de 5 mois pour les précipitations moyennes dépassant 1000 mm/an. La représente des exemples de répartition annuelle des précipitations pour des moyennes de 260 mm (Gao), 552 mm (Mopti) et 1185 mm (Bobo-Dioulasso). La figure représente également la durée de la saison de croissance dans ces trois localités. La saison de croissance est définie comme étant la période pendant laquelle les précipitations dépassent la moitié de l'évapotranspiration potentielle.

Carte I.3
Pluviosité moyenne annuelle dans les pays sahéliens.
Selon Klaver, 1982.

En plus des variations de la moyenne des précipitations sur plusieurs années liées au lieu géographique, il existe également des variations importantes d'une année sur l'autre pour un même lieu ; ces variations sont inversement proportionnelles à la moyenne des précipitations annuelles. Les variations standard de la moyenne des précipitations sont de 31 % pour Gao, de 23 % pour Mopti et de 18 % pour Bobo-Dioulasso ; l'écart standard est donc plus important dans le nord, pour des précipitations moyennes annuelles basses, que dans le sud pour des précipitations moyennes annuelles élevées.

L'évapotranspiration potentielle (*ETP*) représente, lorsque l'eau est disponible en quantité suffisante, la quantité totale d'eau que le sol cède à l'atmosphère, par suite de la transpiration de la couche végétale et de l'évaporation de la surface du sol humide. L'évapotranspiration potentielle calculée (Penman, 1948 ; Berkhout & van Keulen, 1986) est plus élevée dans le nord que dans le sud, par suite d'un niveau plus élevé des températures, d'une moyenne de radiation plus intense, et du déficit plus important de pression de vapeur de l'air (figure I.2).

Figure I.2
Evapotranspiration potentielle selon Penman (1948) et distribution de la pluviosité mensuelle pour les stations météorologiques de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), Mopti et Gao (Mali).
x : Gao (261 mm) ; o : Mopti (552 mm) ; [o noir] : Bobo Dioulasso (1185 mm) ; - - - : évaporation potentielle ; ----- : pluviosité moyenne ; ——— : saison de croissance, définie comme P > 0,5 ETP (selon Boudet, 1978).

Il est clair que la disponibilité en eau pour la croissance de la végétation augmente du nord vers le sud, le gradient pluviométrique allant croissant. L'*ETP* décroît du nord vers le sud en entraînant une diminution des pertes en eau par évaporation à la surface du sol ; il en résulte une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. Par conséquent, la durée de la saison de croissance augmente.

On constate cependant des perturbations importantes de cette description générale, à cause de conditions locales : le processus le plus important à cet égard est le ruissellement pluvial. Ce processus entraîne une redistribution locale de l'eau de pluie : certains endroits auront une disponibilité en eau relativement plus faible (pentes d'où l'eau s'écoule), tandis que d'autres auront une disponibilité en eau relativement plus élevée (dépressions où l'eau se concentre). Dans toute région où l'on assiste à une telle redistribution de l'eau, des pertes en eau se présentent dans les dépressions ; celles-ci sont dues à une évaporation plus élevée (stagnation de l'eau en surface) et à une percolation en profondeur. Lorsque les eaux de

ruissellement se frayent un passage vers les cours d'eau, il en résulte une perte nette en eau disponible pour la croissance des plantes de la région concernée. Par le biais des rivières cette eau risque de se déplacer sur des grandes distances vers d'autres régions telles par exemple le delta central au Mali et le lac Tchad ; dans ces régions la disponibilité en eau pour la croissance de la végétation est davantage régie par l'apport en eau en provenance des rivières que par les précipitations locales.

Les facteurs qui déterminent le degré de ruissellement à un endroit donné, sont le relief et la capacité d'infiltration du sol. Le taux de recouvrement végétal du sol joue également un rôle.

Bien que le paysage dans les pays sahéliens soit généralement assez plat, de légères différences d'altitude ont quand même leur importance pour ce qui concerne le ruissellement, car des pentes de 1-3 % suffisent déjà pour occasionner un ruissellement.

La capacité d'infiltration d'un sol est lié à sa texture, c'est-à-dire la répartition de sa granulométrie : les sols de sable grossier possèdent une capacité d'infiltration plus élevée que les sols limoneux ou argileux. En effet, comparés aux sols limoneux et argileux, les sols de sable grossier présentent des pores plus grands par lesquels l'eau s'infiltre. En outre, dans les deux derniers cas, la force avec laquelle l'eau de pluie heurte la surface du sol peut entraîner une dispersion des particules du sol ; les particules plus petites - argile et limon - risquent de colmater l'entrée des pores existants, menant ainsi en surface à la formation d'une croûte difficilement perméable.

Le taux de couverture végétal du sol (au début de la période de croissance, les restes végétaux de l'année qui précède, par la suite également la végétation de la saison en cours) influence le ruissellement de deux façons. Tout d'abord, la matière organique présente absorbe une partie de l'énergie, avec laquelle l'eau de pluie atteint la surface du sol, diminuant ainsi le risque de dispersion et de formation d'une croûte. Ensuite, cette matière forme une résistance au ruissellement, diminuant la vitesse moyenne de ruissellement et prolongeant la durée de présence de l'eau dans le système : l'infiltration totale se trouve ainsi augmentée et le ruissellement diminué.

En se basant sur l'histoire géologique récente de l'Afrique occidentale, Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 55) distinguent dans leur ouvrage trois ensembles de paysages pour les pays sahéliens. Cette classification en ensembles, suivant le relief et les propriétés du sol (notamment sa texture), permet de prendre conscience de la redistribution en surface de l'eau de pluie sous l'influence du ruissellement. Les différences de caractéristiques entre les ensembles résultent de différences de la matière mère et de la géomorphologie. Les trois ensembles principaux sont : l'ensemble sablonneux, l'ensemble détritique sur grès et latérite et l'ensemble fluviatile et lacustre (figure I.3).

L'ensemble sablonneux se compose de gros dépôts de sable d'origine éolienne couvrant souvent de vastes régions. Le relief varie entre des dunes fortement prononcées et des régions fortement érodées, presque planes. Les dunes peuvent être orientées ENE-OSO (ergs récents) ou selon une forme plus circulaire sans orientation précise (champs de dunes). La texture des sols qui se sont développés sur ce complexe, est généralement sablonneuse ou limono-sablonneuse et rarement sablo-limoneuse. Les ergs

récents se composent généralement de sable grossier avec une capacité d'infiltration élevée, ce qui fait que les précipitations s'infiltrent pratiquement en totalité et qu'aucun ruissellement ne se produit. Les sols à texture plus fine (champs de dunes : sable fin ou sable limoneux) possèdent une capacité d'infiltration plus faible, ce qui fait que notamment lors de pluies intenses, le ruissellement peut se produire sur les surfaces en pente, entraînant une redistribution locale des eaux de pluie.

Figure I.3

Ensembles géomorphologiques principaux de l'Afrique de l'Ouest.

-› sens du ruissellement; roche mère xxx; S = sable, L = limon, A = argile et V = vertique (selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 55)

L'ensemble détritique se compose de sols qui se sont constitués sur du grès ou sur de la latérite. Ces sols sont rarement profonds ; à certains endroits le grès ou la latérite (carapace) se trouvent à la surface. Les sols qui se sont formés sur le grès ne diffèrent pas du point de vue texture des sols de l'ensemble sablonneux, et présentent donc une même capacité d'infiltration. Les sols qui se sont développés sur la latérite, présentent en général une texture fine (limon sablonneux à argile lourde) avec une faible capacité d'infiltration et une tendance à l'encroûtement du sol. En fonction du relief, un ruissellement important peut donc intervenir. Sur les surfaces relativement planes (plateaux), ceci occasionne une redistribution locale de l'eau de pluie ; sur les pentes (glacis), cela provoque un ruissellement important en surface, avec collecte de l'eau dans les parties plus basses du paysage (mares et plaines d'inondation), ou une évacuation par le biais des cours d'eau (oueds et rivières) qui sont assez fréquents dans ce complexe. Les sols sur les plateaux et le glacis présentent une texture argileuse ; au pied du glacis et sur les plaines plus basses la texture des sols est argileuse à vertique. Dans la région de transition de l'ensemble détritique vers l'ensemble sablonneux, les sols lourds peuvent être recouverts d'une couche de sable.

L'ensemble fluviatile et lacustre se compose de sols qui se sont développés sur des dépôts fluviatiles et des sédiments récents ou fossiles de lacs. D'une manière générale, il s'agit là de régions plutôt planes, avec seulement de légères déclivités aux lieux recouverts par le sable ou les dunes éoliennes. Les sols, formés sur les sédiments d'origine possèdent une texture limoneuse à argileuse ; elle est sablonneuse aux endroits où se sont formées les levées alluviales. Cependant aux endroits où une couche de sable a recouvert les sédiments originaux, les sols présentent une texture sablo-limoneuse. Sur les pentes du terrain, le ruissellement est important. L'eau de ruissellement se rassemble dans les parties basses qui sont alors inondées. Une grande partie de l'eau de ruissellement de l'ensemble détritique se retrouve finalement aussi dans l'ensemble fluviatile et lacustre.

Les quantités d'eau de pluie qui ruissellent et les coefficients de ruissellement, ont été évalués par zone de précipitations pour les différents types de sol et sont réunis dans le tableau I.1. Lors de l'évaluation, il a été tenu compte de la structure du sol, des précipitations (notamment de l'intensité et de l'importance des pluies par rapport au total des précipitations ; Snijders, 1988 : III.2.4) et de la capacité de stockage de la surface du sol (valeur *CS* ; III.2.4). Ce dernier facteur est difficile à évaluer, car il est influencé non seulement par la surface du sol, mais également par la végétation et les restes de matière végétale

subsistant des saisons précédentes. Le ruissellement est supposé déjà se produire pour des pentes de plus de 1 %. Il est clair qu'il existe une variabilité énorme d'une année sur l'autre et d'un endroit à un autre, due aux variations des précipitations, aux changements de la couverture végétale et aux différences dans l'intensité de l'exploitation ; les valeurs estimées ne sont qu'une indication globale pour le degré de ruissellement par type de sol.

Tableau I.1
Estimation des coefficients de ruissellement, en fonction de la texture du sol, de la rugosité du sol et de pluviosité annuelle.

	types de sol				
	Sg	Sf	Sl/Ls	L	A
pluviosité (mm/an)					
< 200	0,05	0,15	0,40	0,45	0,40
200-400	0,10	0,20	0,45	0,50	0,45
> 400	0,10	0,20	0,45	0,50	0,50

Sg = sable grossier ; Sf = sable fin ; Sl/Ls = sable limoneux/limon sablonneux ; L = limon ; A = argile.

Enfin, la disponibilité en eau pour la croissance des plantes est également influencée par les caractéristiques de stockage et de transport du sol lui-même. Des différences considérables peuvent exister, liées à la texture et au taux de matières organiques. Cependant dans les sols du Sahel, elles sont dues principalement à des différences de texture, car le taux de matières organiques dans ces sols est bas et varie peu, et de grandes variations plus importantes sont nécessaires pour occasionner de telles différences (Cissé & Vachaud, 1987). Il s'agit surtout de différences de teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement (tableau I.2). Ces deux grandeurs ne sont pas définies avec précision du point de vue physique (Veihmeyer & Hendrickson, 1949). Voici ci-dessous, des définitions générales qui conviennent pour ce manuel :

- La capacité au champ est la quantité d'eau qui peut être stockée par unité de volume dans le sol malgré la pesanteur. Elle indique la valeur supérieure de l'eau susceptible d'être absorbée par les plantes. L'expression en valeur physique mesurable, telle que le potentiel d'eau (valeur pF) n'est pas toujours univoque. Dans les ouvrage spécialisés, les valeurs varient entre pF 2 et pF 3 en fonction du type de sol (III.2.2.1). Pour l'exemple du tableau I.2, la valeur pF a été fixée à 2,5.
- Le point de flétrissement est la quantité d'eau qui peut être retenue par unité de volume du sol, malgré la tension de succion des racines des plantes ; il représente donc la valeur inférieure de l'eau susceptible d'être absorbée par les plantes. Par ailleurs, cette valeur indique donc la quantité d'eau qui doit être stockée dans le sol avant que l'eau ne soit disponible pour les plantes. Le potentiel d'eau correspondant varie moins que pour la capacité au champ, bien que des différences entre les espèces de plantes aient été observées. D'une manière générale, on adopte une valeur de 4,2 pour le pF.

Les différences dans la capacité de stockage par unité de volume du sol ont des conséquences pour la profondeur d'humidification du sol et la quantité d'eau disponible pour les plantes, par unité de profondeur dans le profil. Ces différences sont illustrées dans le tableau I.2.

L'exemple en question est basé sur un sol sec (pF correspondant à 1/3 du point de flétrissement) dans lequel 100 mm d'eau infiltrent totalement. Un calcul a été fait pour déterminer la profondeur d'humidification et pour déterminer la quantité d'eau disponible par couche de sol et dans le profil tout entier.

Il apparaît que le type de sol à une texture légère (S) s'humidifie profondément et que la quantité d'eau disponible est importante, à condition que l'appareil radical explore entièrement le profil ; la disponibilité en eau par couche est faible. Les types de sol à texture lourde (A) sont moins humidifiés en profondeur et la quantité d'eau disponible pour les racines explorant tout le profil est moindre ; la disponibilité par couche du sol est cependant élevée.

Cet exemple fait apparaître également l'importance de la profondeur du sol et du réseau des racines. Les sols peu profonds, courants dans l'ensemble détritique, ont une faible disponibilité en eau pour la croissance des plantes. Dans le cas de sols profonds, l'eau peut s'enfoncer à un tel point qu'elle se trouve hors d'atteinte des racines ; ce phénomène peut se présenter dans des dépressions où beaucoup d'eau se rassemble, mais également sur des sols sablonneux grossiers où l'eau peut s'infiltrer profondément.

Tableau I.2
Disponibilité en eau de trois types de sol, distingués suivant leur texture, au départ de 100 mm d'eau infiltrée.

	S	Sl	A
texture:			
< 2 **µ** (A)	< 3	5	50
2-50 **µ** (L)	< 3	11	11
> 50 **µ** (S)	94	84	39
capacité au champs (cm3/cm3)	0,055	0,103	0,325
point de flétrissement (cm3/cm3)	0,011	0,030	0,180
profondeur d'humidification du profil (mm)	2000	1000	400
disponibilité en eau (mm) :			
par couche du sol de 0,1 m	4,4	7,3	14,5
totalité du profil	86	75	52

jusqu'à 1 m	44	73	52
jusqu'à 0,5 m	22	36,5	52

S = sable ; Sl = sable limoneux ; A = argile.

I.2.2.2. Disponibilité en éléments nutritifs

Outre la disponibilité en eau, la disponibilité en éléments nutritifs est également d'importance primordiale pour la croissance des plantes. Les éléments nutritifs nécessaires sont l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le soufre (S). Il s'agit là de ce qu'on appelle les macro-éléments. De plus, il faut un grand nombre de micro-éléments, mais ceux-ci sont généralement présents en quantité suffisante grâce aux sources naturelles. Les éléments N, P et K doivent notamment être présents en quantités suffisamment importantes pour permettre une croissance optimale.

La disponibilité en éléments nutritifs pour la végétation, en l'absence d'apports artificiels, est définie comme étant la fertilité naturelle du sol. La quantification de cette fertilité du sol est une opération délicate, car elle dépend de différents facteurs et processus.

La fertilité du sol dépend du taux des éléments présents dans le sol. Les analyses chimiques d'échantillons du sol peuvent constituer une aide pour la quantification de ces éléments, mais ces grandeurs mesurées ne peuvent être traduites directement en quantités disponibles pour les plantes ; les éléments nutritifs fixés dans le sol devront être libérés et mis en solution sous une forme susceptible d'être absorbée par les racines des plantes.

Les processus chimiques autant que microbiens qui jouent un rôle, dépendent de la température et de l'humidité ; il en résulte que la durée et la profondeur d'humidification du profil du sol déterminent également la disponibilité et les possibilité d'absorption des éléments nutritifs.

Les plantes mêmes jouent aussi un rôle. La profondeur et la densité des racines sont par exemple importantes, notamment pour des éléments nutritifs difficilement solubilisables tel que P sous forme de phosphates. Les différents aspects de la fertilité du sol seront traités ci-après.

Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 58 et 64) ont pris des échantillons à de nombreux endroits au Mali et ont soumis ces échantillons à un nombre important d'analyses chimiques. Les résultats de ces analyses ont été résumés dans le tableau I.3 par ensemble principal de paysages.

Il ressort de ce tableau, que le taux de matière organique (exprimé en taux de C) et les taux de N et P sont généralement bas ; les taux en K, Mg et Ca sont relativement élevés compte tenu des niveaux de production actuels (Janssen et al., 1990). Ces chiffres d'analyse concordent avec les ouvrages publiés par d'autres auteurs (Ahn, 1970 ; Jones & Wild, 1975), qui traitent également d'autres pays sahéliens.

Le tableau I.3 fait également apparaître des différences d'un lieu à un autre, liées souvent aux particularités du substrat. Les sols qui se sont développés sur des sédiments plus récents, sont généralement plus riches que des sols anciens fortement altérés. Ceci vaut par exemple pour les sols dans le delta actuel du fleuve Niger dans le Mali, comparé aux sols qui se sont développés sur du grès et de la latérite et à ceux qui se sont développés sur les dépôts de sable d'origine éolienne.

Tableau I.3
Résultats des analyses chimiques de quelques sols, groupés suivant les principaux ensembles.

		ensemble sablonneux	ensemble détritique sur grès et latérite		ensemble fluviatile et lacustre				
			Sahel	savane	Delta fossile				Delta actuel
		S(L)	LS	LS*	LS	LAS	LA	A	A*
Carbone (C)	(g/kg)	1,2	1,7	3,7	2,5	2,5	3,5	4,0	13,0
Azote (N)	(g/kg)	0,2	0,2	-	0,5	0,3	0,4	0,4	1,2
Rapport de masse C/N		6	9	-	5	8	9	10	11
P-total	(mg/kg)	50	67	31	70	85	125	170	320
P-Bray II	(mg/kg)	6	5	4	7	5	2	2	2
K-assimilable	(mg/kg)	60	60	84	70	65	90	-	80
pH-eau		6,8	5,7	6,3	6,0	5,9	5,0	5,9	5,5
pH-KCl		5,7	4,4	5,0	4,8	4,4	3,7	4,3	3,9
CEC du sol (pH = 7)	(meq/kg)				30	60	110	170	180
Na-échangeable	(meq/kg)				-	-	-	-	-
K-échangeable	(meq/kg)				2,1	2,4	3,3	8,5	3,6
Ca-échangeable	(meq/kg)				18,0	27,0	38,5	76,5	68,4
Mg-échangeable	(meq/kg)				9,0	12,6	35,2	59,5	32,4
Saturation de base	(meq/kg)				1,0	0,7	0,7	0,85	0,6

S = sable ; L = limon ; A = argile ; * estimé sur la base de quelques échantillons seulement

Localement des différences peuvent également intervenir d'un endroit à un autre, résultant par exemple du ruissellement et de l'érosion qui en résulte et d'une exploitation de longue durée. Lors du ruissellement, la matière organique et la couche supérieure du sol sont déplacées des versants vers les dépressions, ce qui entraîne un appauvrissement des sols en pente et un enrichissement des dépressions. Par l'exploitation, notamment du bétail, une redistribution locale intervient : enrichissement des éléments nutritifs tels que N et P par la concentration d'excréments et d'urine du bétail aux endroits fortement fréquentés, tels que les points d'abreuvement, les camps et les villages. Les terres plus éloignées s'en

trouvent alors appauvries. Le tableau I.4 en donne un exemple.

Tableau I.4
Caractéristiques chimiques des 10 cm supérieurs du sol d'un profil sur sable par rapport à la distance (km) du village de Nara (Mali).

distance de Nara (km)	P-total (mg/kg)	P-Bray II (mg/kg)	N-total (g/kg)	C-total (g/kg)	pH-KCl
0	515	45	1,1	10,0	7,0
1	153	3	0,6	4,6	6,9
2	95	2	0,6	4,6	5,8
6	76	3	0,4	3,3	5,1

Selon les prévisions, la richesse des sols en taux de matières organiques et d'éléments nutritifs doit augmenter du nord au sud, en fonction de l'accroissement des précipitations. En effet, le développement du sol s'intensifie et intervient à plus grande profondeur du profil, lorsque la saison des pluies s'allonge et que l'eau de pluie s'infiltre plus profondément. De plus, une plus grande quantité de matières organiques circule dans le système plante-sol lors d'une croissance plus intense des végétaux. Cette relation est cependant difficile à déterminer à partir des chiffres obtenus par l'analyse chimique du sol. En effet, la variabilité locale des taux de matières organiques et d'éléments nutritifs, décrite ci-dessus, est probablement plus importante que l'augmentation de la richesse des sols du nord vers le sud (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 59).

Pour le reste, ce chapitre se limitera à la disponibilité en N et P pour la croissance végétale ; dans le tableau I.3, il apparaît déjà que ces deux éléments nutritifs étaient disponibles dans le sol de façon limitée. Par ailleurs, les essais de fertilisation ont prouvé notamment que les engrais chimiques contenant de l'azote et du phosphore, permettent de stimuler fortement la production végétale. Ceci vaut autant pour les prairies naturelles (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 193-226) que pour la production agricole. Dans le cas de la production agricole, ce n'est qu'au bout de 5 à 10 ans de fertilisation intensive en azote et en phosphore qu'un manque de potassium apparaît : ceci indique que la disponibilité en potassium pour la production végétale est suffisante sans apport d'engrais chimiques (Pichot et al., 1981).

Sur la base des taux d'azote et de phosphore indiqués dans le tableau I.3, les quantités totales de N et P dans la partie du profil traversée par les racines, varient respectivement entre 300 et 3000 kg/ha et 30 et 60 kg/ha. Cependant, sur ces quantités considérables, seule une très petite partie est réellement

disponible pour la végétation. Il apparaît dans la pratique, que la végétation n'absorbe annuellement que 5 à 35 kg/ha d'azote et 0,5 à 3 kg/ha de phosphore.

Ceci vient au fait que pour la plus grande part, les formes sous lesquelles se présentent l'azote et le phosphore dans le sol, ne sont pas absorbables par les racines des plantes (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 226-273).

La source principale d'azote et de phosphore dans le sol est constituée par la matière organique, c'est-à-dire par les résidus de plantes de composition et d'âge divers. C'est de là que proviennent les éléments sous forme absorbable, après décomposition de la matière organique par les micro-organismes du sol, et la minéralisation qui va de pair. Les micro-organismes utilisent la matière organique comme source d'énergie et comme éléments constitutifs de leur tissu cellulaire. Dans certaines circonstances, une partie de l'azote et du phosphore fixée dans la matière organique, se libère en tant que combinaison inorganique. Cette minéralisation ne se produit que lorsque le sol est suffisamment humide. C'est ainsi que la quantité d'azote et de phosphore minéralisé dépend de la durée de l'état humide du profil et de la profondeur de l'humidification.

Bien qu'aucune relation n'ait pu être établie entre les taux d'azote et de phosphore dans le sol, et la pluviosité annuelle, on constate généralement une plus grande disponibilité en azote et en phosphore à la suite d'une saison de croissance plus longue et d'une humidification plus profonde du sol, au fur et à mesure de l'accroissement de la disponibilité en eau. La indique les quantités d'azote et de phosphore par rapport à la disponibilité croissante en eau. L'estimation de cette disponibilité en eau a été obtenue en corrigeant la moyenne des pluies annuelles par le ruissellement et la concentration des écoulements. La relation entre les quantités d'azote et de phosphore absorbées et la disponibilité croissante en eau du nord vers le sud, apparaît plus clairement lorsque la durée et la profondeur d'humidification du profil sont également prises en ligne de compte (voir plus loin III.2.3).

C'est également la pluie qui fournit l'azote (environ 0,0065 kg/ha par mm) ; aussi, la quantité de N absorbable dans le sol augmente en fonction du gradient pluviométrique. Il faut cependant souligner la complexité de la relation entre la disponibilité annuelle en azote et en phosphore, et la disponibilité en eau (figure I.4). La compréhension de nombreux aspects quantitatifs des processus qui interviennent lors de la transformation de la matière organique en terre est encore loin d'être totale. Il est par conséquent difficile d'évaluer les quantités d'azote et de phosphore qui seront annuellement disponibles pour la végétation, sur la base des seules considérations théoriques. Il n'en faut pour preuve que les variations des quantités d'azote et de phosphore absorbées pour une même durée et profondeur d'humidification et pour une même disponibilité en eau.

Figure I.4

Quantités d'azote et de phosphore absorbées par la végétation, en tant que fonction de la croissance de la disponibilité en eau.

Les données ont été rassemblées sur un trajet nord - sud au Mali dans les années 1976-1979 (selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 310).

I.2.2.3. Le facteur limitatif

Les essais de fertilisation, combinés avec des modèles de simulation, constituent la meilleure manière d'examiner dans quelle mesure, la disponibilité en azote et/ou phosphore et la disponibilité en eau représentent dans des conditions données, le facteur le plus limitatif pour la croissance végétale.

Lors d'essais de fertilisation, les divers éléments nutritifs sont administrés, séparément ou en combinaisons diverses et à des doses suffisantes, sous forme d'engrais chimiques. On dispose de peu de résultats concernant de tels essais sur les prairies naturelles d'Afrique occidentale. Le tableau I.5 relate quelques résultats d'expériences qui ont été décrits par Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 214) : pour une pluviosité de moins de 200 mm/an, la production de la végétation fertilisée n'est pas plus élevée que la production de la végétation non fertilisée. Par contre, la production de la végétation fertilisée est beaucoup plus importante lorsque les pluies dépassent 300 mm par an.

Tableau I.5
Biomasse produite par la strate herbacée (matière sèche, kg/ha) sans et avec engrais chimiques de P, N et N + P, pour des pluviosités variables.

pluviosité (mm/an)	type de sol	témoin	P*	N*	P +N*
450	argile	1800	3200	4000	9500
380	sable grossier/fin	2250	2600	2800	6000
260	sable fin	1020	1130	1580	1270
200	sable grossier/fin	780	540	630	750

* Les quantités appliquées (kg/ha) sont pour 450 et 380 mm 90P, 300N et 90P + 300N et pour 260 et 200 mm 30P, 75N et 30P + 75N.

De telles expériences de fertilisation coûtent cher et demandent beaucoup de temps ; en outre les différences de précipitations annuelles entraînent des différences dans les résultats des expériences de fertilisation. Les techniques de simulation peuvent alors fournir une aide. Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 165-181) ont utilisé un modèle de simulation permettant de calculer le bilan hydrique (déterminé par les pluies) et la croissance maximale de la strate herbacée correspondante (c'est-à-dire non limitée par les éléments nutritifs).

La figure I.5 présente la production calculée de la couche herbacée (y compris les variations possibles occasionnées par le ruissellement) pour une pluviosité annuelle croissante. Les résultats des essais de fertilisation servent alors à vérifier ce modèle. La figure représente également la production actuelle de

la strate herbacée (sans apport d'engrais chimique). Il ressort de cette figure, que dans les conditions règnant en Afrique occidentale, pour une pluviosité de moins de 200 mm par an, c'est la disponibilité en eau qui constitue le facteur limitatif pendant la plus grande partie de la période de croissance, alors que pour une pluviosité annuelle de plus de 300 mm, le facteur limitatif est constitué par la disponibilité en azote et en phosphore notamment. La pluviosité annuelle située entre 200 et 300 mm correspond à une zone de transition.

Bien que la situation des deux facteurs de croissance, disponibilité en eau et disponibilité en azote et en phosphore, s'améliore du nord vers le sud, au fur et à mesure de l'augmentation de la pluviosité, il apparaît que la disponibilité en eau augmente plus rapidement que celle en éléments nutritifs. Il en résulte un manque d'eau par rapport aux éléments nutritifs dans le nord, et une situation inverse dans le sud.

Dans la suite de ce manuel, une infiltration d'eau de 250 mm par saison de pluie, sera considérée comme la valeur limite : en-dessous de 250 mm, c'est la disponibilité en eau qui est limitative ; au-dessus de 250 mm, ce sont notamment N et P qui sont limitatifs pour la production de la biomasse.

Figure I.5
Production de la biomasse de la strate herbacée pour une disponibilité naturelle en éléments nutritifs (production actuelle) et pour une disponibilité optimale d'éléments nutritifs (production maximale) avec une pluviosité croissante.
Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982.

I.2.3. Les caractéristiques des plantes

I.2.3.1. Strate herbacée

Le chapitre précédent a montré que le paysage et le climat déterminent la durée de la saison de croissance ainsi que la disponibilité en éléments nutritifs, en eau et en lumière, nécessaires à la croissance végétale. L'utilisation optimale de la durée de la saison de croissance et des facteurs déterminant la croissance dépend des caractéristiques des espèces : un début et une fin de la croissance de la plante correspondant à ceux de la saison de croissance potentielle, une vitesse de croissance maximum et un enracinement profond, entraîneront une production végétale maximale pour les conditions données.

Ce manuel traitera brièvement des caractéristiques principales des plantes qui jouent un rôle. Pour plus d'informations, on est prié de se référer à Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 71-82 et 284-384), Breman et al. (1980), Cissé (1986) et à la partie IV.

Les caractéristiques des plantes traitées sont : la forme de vie, la forme de croissance, la vitesse de germination, le type de photosynthèse (C_3 ou C_4), la photopériodicité et la capacité de fixation de l'azote.

La grande différence entre les formes de vie des graminées pérennes et celle des annuelles est leur manière de survivre à la saison sèche. Les espèces annuelles traversent la saison sèche exclusivement sous la forme de graines, alors que les graminées pérennes peuvent également traverser localement cette période sous forme végétative (I.1.4). La présence de parties végétatives résiduelles et d'un appareil radical leur permet de repousser rapidement à l'occasion des premières pluies. L'appareil radical, important par rapport à la partie aérienne, est en mesure d'exploiter rapidement et de manière efficace l'eau devenue disponible et les éléments nutritifs ainsi libérés. A l'exception des espèces à germination très rapide, les espèces annuelles nécessitent un certain temps entre le début de la saison des pluies et la croissance, pour le processus de germination et d'installation. Les graminées pérennes sont donc plus en mesure d'utiliser la totalité de la saison de croissance que les graminées annuelles.

A la fin de la saison de croissance, les graminées pérennes emmagasinent de l'énergie et des éléments nutritifs dans les parties végétatives subsistantes et dans les racines. Les graminées pérennes peuvent disposer de ces réserves en plus des éléments nutritifs disponibles chaque année dans le sol, et cela leur donne une vitesse de croissance et une biomasse supérieure aux espèces annuelles.

Les différentes formes de croissance entre les graminées et les dicotylédones sont surtout importante dans les végétations plus denses où la concurrence pour la lumière est importante. Les graminées ayant généralement une forme de croissance verticale éclipseront facilement les dicotylédones. Ceci peut influencer l'utilisation optimale des facteurs de croissance limitatifs (fréquemment les éléments nutritifs). Cette probabilité est élevée car d'autres caractéristiques, telles que la vitesse de germination et la photosynthèse, coïncident (partiellement) avec cette forme de croissance.

Pour une utilisation efficace de la saison de croissance, la vitesse de germination joue un rôle important pour les espèces annuelles : les espèces à germination rapide profitent plus longtemps de la saison de croissance que les espèces à germination lente, ce qui leur permet de mieux exploiter l'eau et les éléments nutritifs disponibles. A ce point de vue, les espèces à germination rapide disposent par rapport aux espèces annuelles à germination lente, des mêmes avantages que les pérennes par rapport aux espèces annuelles.

Le mécanisme de photosynthèse - C_4 ou C_3 - est important pour la vitesse de croissance et l'efficacité d'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs disponibles pour la production de matière végétale. Les espèces à mécanisme de photosynthèse C_4 présentent une plus grande vitesse de croissance et font une meilleure utilisation de l'eau disponible que les espèces à mécanisme C_3. Par ailleurs, elles produisent plus de matière sèche par unité d'azote et de phosphore absorbée, car elles sont en mesure de diluer davantage ces éléments. Les végétations à dominance d'espèces à photosynthèse C_4, produiront donc dans les mêmes conditions de croissance, plus de matière sèche que les végétations à dominance d'espèces à photosynthèse C_3. La sensibilité à la température constitue une autre caractéristique importante, liée au mécanisme de la photosynthèse. Les conditions optimales pour la photosynthèse des plantes à mécanisme C_4 se situent à une température plus élevée que pour les plantes à mécanisme C_3.

Le mécanisme de photosynthèse C_4 ainsi que le C_3, sont présents dans les pays sahéliens, en fonction des circonstances (I.1.4).

La longueur du cycle de nombreuses espèces au Sahel est déterminée par la longueur du jour : elles sont sensibles à la durée du jour pour l'induction à la floraison. Au Sahel, les latitudes et les durées du jour qui en résultent, correspondent aux isohyètes. C'est pourquoi la longueur moyenne du cycle est synchronisée avec la disponibilité moyenne en eau et avec la longueur de la saison de croissance.

Enfin, la dernière caractéristique traitée dans ce manuel est la capacité de certaines espèces de fixer l'azote de l'air. Grâce à cette capacité, ce groupe de plantes est moins dépendant de la quantité limitée d'azote dans le sol. Là où d'autres éléments nutritifs - notamment le phosphore - ne sont pas limitatifs, ce groupe de plantes peut produire plus que les espèces ne fixant pas l'azote. De nombreuses légumineuses au Sahel appartiennent à ce groupe.

Les espèces possédant certaines des caractéristiques décrites ci-dessus, apparaissent là où le paysage et le climat auront fait naître des conditions qui permettent à ces caractéristiques de s'épanouir. Le schéma II.6 indique quelles caractéristiques dominent dans les zones écologiques du Sahel. Les zones écologiques sont définies en fonction de la pluviosité P (croissante du nord vers le sud) et de l'infiltration I ($I > P$, $I = P$ et $I < P$). La durée moyenne du cycle n'est pas indiquée dans ce schéma, mais elle va croissant du nord vers le sud. La capacité de fixation de l'azote n'a pas été indiquée non plus : cette caractéristique ne domine que localement et est liée aux sols ayant une disponibilité en phosphore relativement élevée.

Les graminées pérennes se rencontrent dans la savane soudanaise : la période de sécheresse est plus courte que dans le nord et la pluviosité est plus élevée, ce qui permet la formation de réserves d'eau pour la période sèche. Ces graminées peuvent également apparaître dans le nord - jusque dans le Sahara - aux endroits de rassemblement d'eau par suite du ruissellement : dépressions et oueds ($I > P$). Le long de la côte de l'océan Atlantique, le climat est influencé par la mer (température plus basse, humidité de l'air plus élevée). La zone de transition entre le climat méditerranéen aux hivers pluvieux, et le climat tropical aux pluies estivales, se situe en Mauritanie, la distribution des pluies y est par conséquent irrégulière : il n'y a pas à strictement parler de période sèche. Ce phénomène allant de pair avec l'influence de la mer, il se crée, pour une même pluviosité moyenne, des conditions favorisant un peu plus les graminées pérennes et les espèces ligneuses que dans l'intérieur des terres.

Le nord du Sahel est caractérisé par une brève saison des pluies, clairement délimitée, mais la disponibilité en eau est faible. Les températures pendant la saison des pluies sont élevées. La plupart des sols de cette zone sont constitués de sable grossier ; aussi, généralement la disponibilité en eau est-elle égale à la pluviosité. C'est un milieu où dominent les espèces à germination rapide, à cycle court et à mécanisme de photosynthèse C_4 (températures élevées pendant la saison des pluies). Ces espèces peuvent être aussi bien des graminées que des dicotylédones : la végétation clairsemée permet la coexistence des deux groupes. Aux endroits où l'eau de pluie ruisselle, il n'y a pas seulement une plus faible disponibilité en eau : la saison des pluies devient plus irrégulière parce que le risque de périodes

sèches pendant la période des pluies augmente. Les périodes sèches au cours du début de la saison des pluies entraînent la disparition des plantules des espèces à germination rapide. Lorsque de telles périodes se répètent, la réserve de graines des espèces à germination rapide s'épuise : à ces endroits, les espèces à germination lente domineront souvent la végétation. Aux endroits où les écoulements se concentrent, toutes les caractéristiques et combinaisons de caractéristiques sont présentes, mais les graminées annuelles C_4 à germination rapide et homogène domineront.

Dans le sud du Sahel, les graminées annuelles à mécanisme C_4 et germination rapide dominent également, notamment aux endroits où l'infiltration est égale à l'eau de pluie (I = P) et aux endroits où les écoulements se concentrent (I > P). Les dicotylédones, même à mécanisme de photosynthèse C_4, y sont moins fréquentes : la végétation plus dense implique que les dicotylédones sont désavantagées dans la concurrence pour la lumière de par leur forme de croissance. Les graminées annuelles à germination lente ainsi que les dicotylédones apparaissent aux endroits de ruissellement de l'eau de pluie.

Au fur et à mesure de la progression vers le sud, la dominance des graminées à mécanisme C_4 et germination rapide est remplacée par celle des graminées pérennes. Ceci est dû à la prolongation de la saison de croissance et à l'augmentation de la disponibilité en eau dans la savane soudanaise. L'importance des espèces à mécanisme C_3 augmente également, car les températures sont un peu modérées par une humidité de l'air plus élevée et par l'ombre du recouvrement croissant de la strate ligneuse.

Les caractéristiques et combinaisons de caractéristiques des plantes s'adaptent aux conditions de croissance déterminées par le paysage et le climat. La végétation peut ainsi utiliser au maximum la saison de croissance qui augmente dans les pays sahéliens au fur et à mesure de la progression vers le sud, et profiter au maximum de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs. C'est pourquoi la production végétale dans le sud est plus importante que dans le nord comme le montre la figure I.6. Cette figure comporte également un certain nombre de noms d'espèces qui dominaient le long du trajet nord sud au Mali, pendant la période 1976-1979. Il faut cependant les considérer plutôt comme représentant un groupe d'espèces possédant toutes plus ou moins les mêmes combinaisons de caractéristiques. Les espèces dominantes représentées dans la figure I.6 peuvent être remplacées par d'autres avec des combinaisons à peu près analogues (IV).

Figure I.6

Influence de la composition de la végétation sur le rapport entre la biomasse et la disponibilité en eau.
Le rapport présenté et les espèces considérées comme dominantes compte tenu de leur part dans la production de la biomasse ont été observés au cours de la période 1976-1979 sur un trajet nord-sud au Mali (selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 318).

Les considérations précédentes sont basées sur la durée moyenne de la saison de croissance, ainsi que sur la disponibilité moyenne en eau et en éléments nutritifs, toutes deux fonction du paysage et du

climat. Les variations de ces moyennes sont cependant très importantes, notamment à cause de la pluviosité et de la répartition des pluies. De plus, la pâture (principalement par le biais du bilan hydrique) et les feux peuvent modifier les conditions moyennes de croissance. Les végétations composées d'espèces annuelles sont dynamiques : la composition peut se modifier assez rapidement ce qui peut entraîner une dominance d'espèces ayant des combinaisons de caractéristiques adaptées aux conditions de croissance nouvelles.

Cependant, les modifications des conditions de croissance dans les pays sahéliens sont très grandes, fréquentes, et plus rapides que l'adaptation de la végétation aux changements des conditions de croissance. Ceci vaut pour les végétations annuelles, mais davantage encore pour les végétations composées de graminées pérennes. Une synchronisation optimale entre la composition de la végétation et les conditions de croissance sera rare, et on assistera régulièrement à une exploitation sous-optimale des conditions de croissance. La compréhension, la prédiction et la quantification de la dynamique de la composition floristique est importante pour quantifier les effets de cette exploitation sous-optimale sur la production végétale. Cette dynamique est représentée sous une forme simplifiée dans la figure I.7.

Figure I.7

Dynamique des végétations dans les pays sahéliens, avec les modifications possibles représentées par des flèches.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982, p. 132; pour les explications, se référer au texte.

Cette figure répartit les plantes en trois groupes suivant un certain nombre de caractéristiques : les graminées pérennes à mécanisme C_4, les espèces annuelles à germination rapide et mécanisme de photosynthèse C, et les espèces annuelles à germination lente. Des modifications peuvent intervenir par suite de changements dans la pluviosité, la répartition des pluies, la pâture et les feux. Ces mouvements entre les groupes, figurés par des flèches, peuvent se produire soudainement ou lentement et sont, en principe, réversibles.

Les changements brusques (2a et 2b) sont la conséquence surtout de modifications de la pluviosité : une série d'années sèches succédant à une suite d'années plus humides. De plus, une telle série d'années sèches succédant à des années plus humides aura des conséquences pour la dispersion des groupes dans le sens nord- sud (4c). Ces décalages (2a, 2b, et 4c) sont en principe réversibles lorsque les années sèches sont à nouveau suivies par des années humides, mais ces processus de régénération (3a, 3b et 4a) interviennent beaucoup plus lentement ; ainsi, pendant un certain nombre d'années, on assiste à une utilisation sous-optimale des conditions de croissance améliorées.

Les lents décalages (1a et 1b) sont surtout la conséquence de la pâture. Notamment sur les sols sensibles au compactage superficiel, la pâture peut renforcer le ruissellement de l'eau de pluie, ce qui engendre des conditions plus avantageuses pour les espèces annuelles que pour les graminées pérennes, et plus favorables aux espèces annuelles à germination lente qu'aux espèces annuelles à germination rapide. La pâture pendant la période des pluies peut avoir pour conséquence la disparition des graminées pérennes à des endroits où elles dominaient (I.1.4). Là où les espèces annuelles C_4 à germination rapide dominent,

les espèces annuelles à germination lente peuvent prendre la relève lorsque la pâture est intensif au début de la saison des pluies.

L'absence de feux pendant la saison sèche conduit au même résultat. Lorsque sur des sols à bonne infiltration, la végétation n'est pas broutée ou brûlée, une accumulation de paille peut en résulter. De grandes quantités de paille créent des conditions favorables aux espèces à germination lente (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 350). La pâture et les feux ont donc sur ces sols un effet inverse à l'effet visible sur les sols à mauvaise infiltration, où la végétation et des restes de végétation freinent le compactage superficiel.

Une protection de la végétation contre la pâture a une influence comparable à celle des années pluvieuses (3a et 3b).

Des différences dans la répartition des précipitations, notamment au début de la saison des pluies, entraînent des décalages entre les deux groupes d'espèces annuelles (2b) mais également à l'intérieur des groupes (4b). Ces déphasages sont entre autres imputables à de petites différences dans la vitesse de germination.

I.2.3.2. Espèces ligneuses

Il est à présent question de la contribution des arbres et des arbustes dans la production végétale.

Pour les espèces ligneuses, contrairement à la strate herbacée, il n'existe pas ou peu de connaissances sur les caractéristiques importantes propres à l'espèce, susceptibles de jouer un rôle dans l'exploitation des facteurs déterminants de croissance. Mais, tant que groupe, certaines caractéristiques générales peuvent être données.

Pour un certain nombre de caractéristiques, les espèces ligneuses ressemblent à des graminées pérennes (I.1.4). Les espèces ligneuses diffèrent des graminées pérennes par leur puissance d'enracinement profond et sont ainsi en mesure d'exploiter des réserves d'eau inaccessibles pour la strate herbacée. La présence des espèces ligneuses dans les pays sahéliens est dépendante de cette caractéristique (figure I.8).

Kessler & Breman (en préparation) ont quantifié la présence des espèces ligneuses dans les pays sahéliens d'après le recouvrement (figure I.9). Le recouvrement est dépendant de la pluviosité moyenne annuelle et du paysage. Les interdépendances présentées constituent un résumé des données publiées par les ouvrages spécialisés des 50 dernières années. Compte tenu de l'origine de la majorité de ces données, il est plus aisé de faire une classification selon les unités de paysage utilisées par l'IEMVT (Boudet, 1978), soit :
Os : dunes de sable fortement vallonnées ;
Ps : surfaces de sable avec peu de relief ;
Pl : plaines à texture limono-sablonneuse ;

La : surfaces basses ou dépressions avec des sols à texture argilo-limoneuse.

Figure I.8

Importance relative des espèces ligneuses par rapport à la strate herbacée sur les sols profonds sur un trajet nord-sud, par rapport à la disponibilité en eau.

Selon Kessler & Breman, en préparation.

Les autres paysages distingués par Boudet (1978 ; LA/R, RF et S/R) sont résumés sous l'appellation sols peu profonds (Sq) ; le nombre d'observations par substrat individuel était trop restreint pour ces paysages distincts.

Il existe une importante similitude entre cette classification en paysages et la classification présentée dans I.1.2.1 . Les unités Os et Ps dominent dans l'ensemble sablonneux ; les unités P1 et La dominent dans l'ensemble fluviatile, et l'ensemble détritique est composé d'une mosaïque de Sq, Pl et La : plateaux latéritiques (Sq) alternant avec des vallées, dont les parties les plus basses doivent être considérées comme La et le reste comme Ps (figure I.3).

Figure I.9

Taux de couverture (%) par les espèces ligneuses par rapport au paysage et à la pluviosité annuelle moyenne, avant et après la sécheresse dans les années '70.

* recouvrement bien plus bas en cas d'inondations de longue durée (selon Kessler & Breman, en préparation).

Les courbes tracées dans la figure I.9 donnent le rapport entre la pluviosité et le taux de recouvrement par les espèces ligneuses pour les différents paysages distinctifs du Sahel et du nord de la savane soudanaise. Au sud de l'isohyète de 600 mm, le rapport est peu fiable à cause d'un manque de données et de l'influence variable de l'agriculture. Les courbes ont été utilisées pour évaluer la disponibilité en fourrage (I.2.4 et I.2.5) : il existe cependant des indications selon lesquelles le taux de recouvrement pour le sud de la zone soudanaise seraient sous-estimé, ce qui entraîne une surestimation de la disponibilité du fourrage de la strate herbacée pour cette zone, et une sous-estimation de celle de la couche ligneuse.

Les données qui ont servi de base à ces tracés datent de l'après-sécheresse du début des années 70. La courbe interrompue est basée sur des données de la période avant la sécheresse. Compte tenu de la période relativement longue d'années à bonne pluviosité ayant précédé cette sécheresse, le taux de recouvrement d'avant les années 70 est considéré comme pouvant à nouveau être obtenu après une période de bonne pluviosité, notamment dans le cas d'un reboisement actif.

La sécheresse de 1983 et 1984 a cependant entraîné en de nombreux endroits, une grande mortalité, surtout dans les paysages Pl et Sq (pour certaines espèces jusqu'au fond de la savane). Il peut donc être admis que le recouvrement actuel par les espèces ligneuses est encore inférieur au tracé de la figure I.9 (Hiernaux *et al*., 1989 ; Breman & Diarra, 1991).

Outre la sécheresse, d'autres facteurs influencent positivement ou négativement le taux de recouvrement par les espèces ligneuses (tableau I.6). Il est impossible de quantifier les effets de ces facteurs sur le taux de recouvrement. C'est pourquoi seules des tendances figurent dans le tableau.

Le tableau peut servir à qualifier d'optimistes ou de pessimistes les estimations effectuées sur la base de la figure I.9 et d'utiliser ensuite les données obtenues en fonction du jugement. Une approche plus quantitative est souhaitable pour la coupe du bois, l'agriculture et les feux de brousse.

Tableau I.6
Facteurs influençant le taux de recouvrement des espèces ligneuses d'une façon positive ou négative.

	nord du Sahel	sud du Sahel	savane soudanaise
sécheresse	---	--	-
broutage	+/-	-	+
feux	0	-	--
agriculture :			
extensive	0	+/-	+/-
intensive	0	0	--
coupe du bois	-	--	---

0 : pas d'influence ; +/- : tendance négligeable ; + : léger accroissement ; -, -- et --- : respectivement baisse légère, modérée et forte.

La coupe du bois, agression à laquelle sont soumises les espèces ligneuses, entraîne un taux de recouvrement décroissant lorsque l'exploitation annuelle dépasse la production. Kessler & Breman (en préparation) estiment que la population est obligée de sacrifier le peuplement forestier dès que la densité de la population dépasse par km2, 5 habitants pour le nord du Sahel, 15 pour le sud du Sahel, 90 pour le nord de la savane et 180 pour le sud de la savane, et ce en l'absence d'approvisionnement extérieur en bois, de sources d'énergies et de matériaux de construction alternatifs.

Une estimation globale des conséquences de la surpopulation est possible à travers la coupe totale, à condition de connaître à peu près l'année pendant laquelle la capacité de charge des espèces ligneuses a été dépassée, pour un accroissement de la population correspondant à celui des dernières décennies (1,5-3 % par an). La figure I.10 indique globalement la vitesse à laquelle le taux de recouvrement diminuera. C'est aux environs des grandes villes que la diminution est la plus rapide, là où la population s'accroît par les naissances et l'immigration. Elle est relativement lente dans le nord du Sahel, à cause de la lente progression démographique de la population pastorale et de l'émigration.

Figure I.10

Diminution du taux moyen de recouvrement des espèces ligneuses dans le temps, dans le nord du Sahel (——), dans le sud du Sahel (- - -), et dans la zone soudanaise (-----), à partir du moment de dépassement de la capacité de charge, pour une croissance démographique de 3%.

Selon les études, le taux de recouvrement des champs par les espèces ligneuses varie de 0 à 15 %. Il est admis que la moyenne est d'environ 5 %, mais dans le cas de la culture de riz, le taux de recouvrement est nul.

A la longue, une protection efficace contre le feu entraînera généralement un taux de recouvrement plus élevé, notamment dans la savane (tableau I.6). Dans le sud du Sahel, on peut espérer un effet positif sur des sols sablonneux à infiltration homogène d'eau (Os & Ps, figure I.9) ; ailleurs la fréquence des feux est limitée.

Sur la base des données fournies par les ouvrages spécialisés et la fréquence des feux, on suppose qu'une protection à long terme contre les feux entraînera, si la pluviosité n'est pas déficitaire, une augmentation du taux de recouvrement représenté dans la figure I.9 (avant sécheresse). Dans la savane, l'augmentation sera du double, dans le sud du Sahel, sur les sols sablonneux, elle sera de 50 %, et ailleurs dans le sud du Sahel, elle sera de 25 % maximum.

Les facteurs qui ont une influence négative sur le taux de recouvrement ligneux, empêchent les possibilités de croissance d'être utilisées de façon optimale.

I.2.4. Production végétale et taux d'azote

L'estimation de la production végétale des pâturages sahéliens figure dans le tableau I.7 pour les années normales (p50% : probabilité selon laquelle 50 % des années subiront une pluviosité moindre), et les années sèches (p10% : probabilité selon laquelle 10 % des années subiront une pluviosité égale ou moindre).

Lors de l'estimation de cette production, répartie en strate herbacée et pâturage aérien (production de feuilles, fruits et rameaux d'espèces ligneuses), il a été tenu compte de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs, des caractéristiques des plantes et de la composition de la végétation (I.2.2 et I.2.3).

La méthode utilisée distingue d'abord différentes unités de paysage selon la classification de Boudet (1978). Les raisons de ce choix ont été exposées dans le paragraphe précédent. Cependant, l'évaluation de la disponibilité en eau par ensemble a été simplifiée.

A l'intérieur de ces unités de paysage, les surfaces où se concentrent les écoulements sont réduites par rapport aux surfaces où l'eau ruisselle. Pour estimer la production totale moyenne par unité de paysage, ces parties peuvent donc être négligées. Ensuite, les coefficients de ruissellement (facteur R) ont été estimés à l'aide du tableau I.1 pour les parties où l'eau ruisselle. On a donc tenu compte de la texture du

sol correspondant à une unité de paysage et de la position géographique (tableau I.8). La disponibilité en eau dans l'unité a été calculée en tenant compte de l'effet correcteur du ruissellement sur la pluviosité moyenne. Il en résulte une (légère) sous-estimation de la production, puisque l'eau supplémentaire dans les dépressions n'a pas été considérée. Cette sous-estimation est cependant moindre qu'il n'y paraît à première vue. En effet, des pertes d'eau interviennent dans les dépressions : percolation hors de la zone racinaire, évaporation supplémentaire à partir des flaques d'eau et des mares - entraînant localement une absence de végétation -, et pertes par les marigots et les fleuves ; en outre les éléments nutritifs deviennent rapidement limitatifs. Tous ces aspects ont cependant été pris en compte dans II.3 et II.4.

Tableau I.7
Estimations de production (kg/ha), répartie suivant la strate herbacée et le fourrage ligneux des espèces ligneuses au cours d'années normales (p50%) et d'années sèches (p10%), par unité et zone climatique ; nord du Sahel (200 mm), sud du Sahel (450 mm)*, nord de la savane soudanaise (750 mm)* et sud de la savane soudanaise (1050 mm)*, vu le recouvrement des espèces ligneuses au cours de deuxième moitié des années soixante-dix.*

		nord du Sahel		sud du Sahel		nord de la savane		sud de la savane	
		strate herbacée	fourrage ligneux	strate herbacée	fourrage ligneux	strate herbacée	fourrage ligneux	strate herbacée	fourrage ligneux
unité de paysage									
Os	p50%	750	70	2050	130	-	-	-	-
	p10%	150	40	1550	80	-	-	-	-
Ps	p50%	600	70	1750	130	-	-	-	-
	p10%	50	40	1100	80	-	-	-	-
Pl	p50%	150	70	850	650	1600	950	1600	1750
	p10%	-	40	200	430	1350	750	1400	1550
La	p50%	1250	70	3250	720	2300	5400	4400	5400
	p10%	200	40	2300	480	1900	4200	4100	4200
Sq	p50%	550	-	1100	580	1600	950	1950	1450
	p10%	50	-	650	380	1350	750	1750	1300

* pluviosité moyenne de la zone pour une année normale.

Tableau I.8
Coefficients de ruissellement et de concentration des écoulements des ensembles.

	pluviosité <= 200 mm		pluviosité >200 mm	
	coefficient de ruissellement	coefficient de concentration des écoulements	coefficient de ruissellement	coefficient de concentration des écoulements
ensemble sablonneux :				
Os : dunes parallèles, sables grossiers	0,05	-	0,10	-
Ps : dunes plus plates, sables plus fins	0,15	-	0,20	-
ensemble détritique :				
Sq : plateaux, redistribution locale de l'eau, sols limoneux peu profonds	0,15 1)	-	0,40 2)	-
Pl : glacis,pentant vers La, sols limoneux	0,45	-	0,50 -	
La : vallées, avec afflux de Pl, limon/ argile	-	0,25	-	0,25
ensemble fluviatile :				
Pl :plaines pentant vers La, sols limoneux	0,45	-	0,50 -	
La : dépressions avec afflux, limon/ argile	-	0,25	-	0,25
Ps/Pl : paquet de sable, sols limo-sablonneux	0,40	-	0,45	-

1) valeur basse en comparaison avec le tableau I.1, vue la fréquence des couvertures sablonneuses au Nord ;
2) dans la savane 0,50.

Dans cette méthode d'évaluation de la disponibilité en eau, l'unité « La »est un cas à part. Cette unité se compose de plaines basses et de dépressions recevant de l'eau en provenance des unités environnantes, en plus de la pluviosité, ce qui provoque parfois l'inondation prolongée de certaines parties. La production de telles plaines d'inondation doit être estimée sur la base des données obtenues sur le terrain (voir suite). S'il n'y a pas d'inondations, la disponibilité en eau de cette unité de paysage a été estimée arbitrairement à 25 % de plus que l'eau de pluie (tableau I.1).

Les calculs ont été effectués séparément pour quatre zones climatiques, différenciées sur la base de la pluviosité annuelle : nord du Sahel (200 mm), sud du Sahel (450 mm), nord (750 mm) et sud (1050 mm) de la zone soudanaise.

La classification en unités de paysage et zones climatiques aboutit à la production végétale représentée par le tableau I.7. La méthode de calcul utilisée est développée dans les parties II et III.

Boudet (1978) et Le Houérou & Hoste (1977) donnent également des données relatives à la production de la strate herbacée dans les pays sahéliens. Boudet détaille la production de la strate herbacée selon les zones climatiques et les unités de paysage. Houérou et Hoste donnent simplement la relation entre les productions constatées et la pluviosité. La figure I.11 représente ces données ainsi que les productions estimées.

Figure 1.II
Comparaison entre la production calculée de la strate herbacée (o ; - - - : moyenne pondérée) et les observations publiées par Le Houérou & Hoste (1977 ; [o noir]) et Boudet (1978 ; x).

Les données rassemblées par Le Houérou et Hoste, font état de nombreuses variations, imputables à la variation des unités, dans la mesure où la production n'a été estimée qu'en fonction de la pluviosité.

Les variations par zone climatique qui apparaissent dans les données de Boudet, ainsi que celles calculées à partir du tableau I.7 coïncident assez bien et restent dans les limites de la classification de Le Houérou & Hoste. La production de l'unité « La » constitue une exception. Dans tout les cas cette production dépasse les valeurs de Le Houérou & Hoste ; mais ils n'ont pas tenu compte de la production dans les dépressions.

Pour l'élevage, ce n'est pas seulement la quantité qui importe, mais également la qualité de la matière végétale produite. La qualité du fourrage est un concept complexe : d'une part, la qualité est dépendante du taux d'éléments nutritifs, d'autre part, elle dépend de la quantité que l'animal voudra bien consommer. Pour ce dernier point, il ne s'agit pas tellement - et certainement pas exclusivement - d'une préférence due au goût et à la présence d'épines ou de matières toxiques ; la consommation de nourriture est déterminée par la teneur en éléments nutritifs (III.3). Il s'agit là principalement du taux en substances digestibles et en azote.

Dans les pâturages où les espèces annuelles dominent, le taux d'azote constitue l'expression d'une

certaine combinaison entre le sol et le climat, plutôt qu'une caractéristique de l'espèce. Ainsi le taux d'azote de nombreuses espèces peut varier d'un facteur 2 à 3, en fonction de l'endroit et de l'année (Breman et al., 1984).

Tout comme la production, la qualité dépend fortement de la disponibilité relative en eau et en éléments nutritifs. Ceci ne vaut pas uniquement pour le taux d'azote, mais également pour le taux de phosphore. Dans ce cas seul le taux d'azote est traité, car globalement l'azote joue un rôle un peu plus important et plus fréquent dans la production végétale et animale que le phosphore. Les taux moyens de phosphore peuvent cependant être obtenus en multipliant par 0,1 les taux d'azote évalués ci-dessous. Les résultats se trouveront cependant surévalués pour les unités de paysage à fort ruissellement, et sous-évalués dans les régions où la concentration des écoulements est importante (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 313-315 et 369).

Bien que la digestibilité soit plutôt déterminée par l'espèce que par le milieu, il existe également une corrélation entre le taux d'azote et la digestibilité (III.3). Pour une impression globale, la digestibilité peut donc être déduite de l'estimation des taux d'azote.

Concernant d'autres éléments, on peut se référer aux ouvrages de l'IEMVT, publiés récemment par le CTA (IEMVT, [1987]a, b et c) et à III.3.

Le taux d'azote diffère à chaque moment de la saison de croissance, il est fortement dépendant du stade phénologique de la végétation : de la plantule à la plante adulte, le taux d'azote diminue. Il y a cependant des différences entre les groupes d'espèces (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 199-204) : le taux d'azote des plantes à mécanisme C_4 est en général plus faible que celui des plantes à mécanisme C_3, alors que le taux d'azote des espèces fixatrices d'azote est généralement plus élevé que celui des plantes à mécanisme C_3. Le tableau I.9 représente les taux maximum et minimum d'azote pour les trois groupes d'espèces au stade de la plantule et au stade de floraison/mûrissement.

Tableau I.9
Taux minimum et maximum d'azote pour plantes à mécanisme C_4, C_3 et plantes à fixation d'azote, au stade de germination et à celui de floraison/mûrissement.

	stade de germination		floraison/mûrissement	
	minimum	maximum	minimum	maximum
C_4	15	50	5	15
C_3	20	60	10	35
espèces fixatrices d'azote	30	70	15	40

Le taux d'azote dépend de la disponibilité en eau dans le sol par rapport à la disponibilité en azote. Lorsque la disponibilité en eau est relativement faible par rapport à la disponibilité en azote, le taux d'azote sera élevé et pourra atteindre les valeurs maximales. Inversement, une disponibilité en eau relativement élevée par rapport à la disponibilité en azote entraîne un taux d'azote faible et pouvant atteindre les valeurs minimales. Ainsi, dans le nord du Sahel, la moyenne du taux d'azote dans la strate herbacée à la fin de la saison de croissance sera élevée, suite à une disponibilité relativement élevée d'azote par rapport à la faible disponibilité en eau. Au fur et à mesure de la progression vers le sud, la disponibilité en eau augmente rapidement, alors que la disponibilité en azote s'accroît plus lentement (I.2.1). C'est pourquoi la moyenne du taux d'azote de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance diminue vers le sud (figure I.12).

Figure I.12
Taux moyen d'azote à la fin de la saison de croissance pour plantes annuelles à mécanisme C_3 (-----), C_4 (-.-.-), à fixation d'azote et pour graminées pérennes C_4 (——) par rapport à la pluviosité.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 322.

A l'intérieur d'une zone climatique, le taux d'azote de la strate herbacée variera également à la fin de la saison de croissance, dans la mesure où la disponibilité en eau variera par suite du ruissellement et de la concentration des écoulements. Le taux d'azote sera plus élevé aux endroits où l'eau ruisselle, moins élevé là où de grandes quantités d'eau affluent, et lorsque l'eau de pluie infiltrée est égale à la pluviosité, on observera des valeurs intermédiaires.

De plus, le ruissellement et la concentration des écoulements influencent la composition de la végétation (I.2.3). Le tableau I.10 représente l'importance des plantes C_3, C_4 et des plantes fixatrices d'azote, en fonction de la concentration des écoulements et du ruissellement. Il s'agit de la composition moyenne, telle qu'elle a été observée pendant quatre années sur un trajet nord-sud au Mali. Il ressort de ce tableau, que notamment aux endroits de ruissellement, les plantes C_3 et fixatrices d'azote sont les plus présentes dans la végétation. Cumulé à l'effet qu'exerce la plus faible disponibilité en eau sur le taux d'azote, ceci entraîne dans la même zone climatique, des taux d'azote plus élevés aux endroits de ruissellement qu'aux endroits de concentration des écoulements et où l'infiltration est homogène.

Tableau I.10
Taux de plantes à mécanisme C_4, C_3 et à fixation d'azote, exprimé sous forme de fraction de la biomasse totale de la strate herbacée, à la fin de la saison de croissance à des endroits à infiltration homogène (I = P), à ruissellement (I < P) et à concentration des écoulements (I > P).

	I = P	I < P	I > P
C_4	0,73	0,56	0,81
C_3	0,22	0,14	0,08
espèces fixatrices d'azote	0,05	0,30	0,11

Une estimation du taux d'azote de la couche herbacée à la fin de la saison de croissance a été faite sur la base de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs, en tenant compte de la composition de la végétation. La méthode de calcul utilisée est commentée dans les parties II et III : le résultat figure dans le tableau I.11. Un classement a été effectué selon les unités de paysage et les zones climatiques ; ce tableau peut donc être utilisé avec la production de la biomasse figurant au tableau I.7.

Tableau I.11
Taux d'azote (g/kg) de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance pour les années normales (p50%) et sèches (p10%) par unité de paysage et par zone climatique : nord du Sahel (200 mm), sud du Sahel (450 mm)*, nord (750 mm)* et sud de la savane soudanaise (1050 mm)*.*

unité de paysage		nord du Sahel	sud du Sahel	nord de la savane	sud de la savane
Os	p50%	12,5	7,6	-	-
	p10%	23,0	10,0	-	-
Ps	p50%	14,7	8,0	-	-
	p10%	25,0	11,3	-	-
Pl	p50%	21,3	12,9	7,0	5,5
	p10%	-	15,5	8,0	6,0
La	p50%	9,5	6,1	5,4	5,0
	p10%	16,5	7,5	5,8	5,3
Sq	p50%	14,6	8,0	7,0	5,5
	p10%	25,0	11,3	8,2	6,1

* pluviosité moyenne de la zone pour une année normale.

En comparaison avec le taux d'azote de la couche herbacée, le taux d'azote des feuilles d'arbre varie moins fortement : à la fin de la période des pluies, il varie de 26 g/kg dans le nord du Sahel à 25 g/kg

dans le sud du Sahel et à 22 g/kg dans la zone soudanaise.

Le taux d'azote des fruits et rameaux est inférieur, et la moyenne du taux d'azote de toutes les parties utilisables pour le bétail : feuille, rameaux et fruits (« pâturage aèrien ») se situe dans les trois zones en question, à respectivement 18,2, 17,5 et 15,4 g/kg. Les taux élevés d'azote par rapport à la strate herbacée, les différences minimes à l'intérieur de la zone climatique et la faible baisse face à l'augmentation de la disponibilité en eau dans le sens nord-sud, sont la conséquence de la capacité des espèces ligneuses à constituer dans les parties végétales résiduelles, leur propre réserve importante d'éléments nutritifs.

La production estimée de la biomasse et le taux d'azote qui s'y rapporte, représente la situation moyenne à la fin de la période des pluies. Pendant la saison sèche qui lui succède, des pertes interviennent dans la biomasse et les taux d'azote baissent. Cet état des choses est dû aux éléments suivants :
- pluies tardives au début de la saison sèche et pluies précoces à la fin de la saison sèche, entraînant le pourrissement ;
- vent entraînant le recouvrement de la matière organique par le sable ;
- tombée des graines et récolte des graines (entre autres par les fourmis) ;
- voracité, des termites, par exemple ;
- feux de brousse.

Les pertes sont surtout importantes au début (octobre-décembre) et à la fin (avril-mai) de la saison sèche.

Le taux d'azote de la strate herbacée à la fin de la saison sèche (y) peut être calculé à l'aide du taux d'azote à la fin de la saison humide (x : tableau I.11), selon l'équation y = 0,44x + 1,27 (II.2.2.4). Le taux d'azote du fourrage ligneux représente environ 2/3 du taux d'azote à la fin de la saison des pluies.

La méthode de calcul utilisée sous-estime quelque peu la situation aux endroits où les graminées pérennes et les espèces ligneuses forment des composantes importantes de la végétation. Pendant la saison sèche, il se peut que la croissance des graminées pérennes ne soit pas entièrement arrêtée. Cette production a été évaluée par unité de paysage et par zone climatique, et est représentée dans le tableau I.12. Le taux d'azote de cette nouvelle croissance est de l'ordre de 10 g/kg.

Tableau I.12
Repousse (kg/ha) des graminées pérennes au cours de la saison sèche, pour les années normales (p50%) et sèches (p10%), vue la répartition des graminées pérennes au cours de la deuxième moitié des années soixante-dix.

	nord du Sahel	nord de la savane	sud de la savane

unité de paysage				
Pl	p50%	-	25	50
	p10%	-	-	10
La	p50%	10	100	200
	p10%	-	25	50
Sq	p50%	-	5	10
	p10%	-	-	-

Certaines espèces ligneuses forment déjà de nouvelles feuilles avant le début réel de la saison des pluies. Cette production est estimée à 15 % de la production réalisée à la fin de la période des pluies. Le taux d'azote de ces jeunes feuilles est estimée à 31 g/kg dans le nord du Sahel, à 30 dans le sud du Sahel et à 29 dans le nord et le sud de la zone soudanaise.

Jusqu'à présent la production végétale des grandes plaines d'inondation des pays du Sahel, tels le delta du Mali et le lac Tchad n'a pas été prise en considération. La production végétale dans cet ensemble n'est pas directement liée à la pluviosité locale, mais dépend de l'apport d'eau par les rivières. D'ailleurs le sol est plus riche en éléments nutritifs, car il s'agit de dépôts alluviaux plus récents (tableau I.3). Cela signifie que la méthode d'évaluation de la production végétale et du taux d'azote, telle qu'elle est utilisée pour tous les autres ensembles, ne peut s'appliquer à ces régions spécifiques. Pour les évaluations de la production de ces plaines d'inondation, il faut donc faire des mesures ou bien se référer aux données en provenance des études.

Breman & Traoré (1987) et Traoré (1978) donnent des chiffres pour le delta central du Mali : 6500 kg/ha pour les années normales (p50%) et 4500 kg/ha pour les années sèches (p10%). Les taux d'azote qui ont été mesurés à la fin de la saison de croissance se situent à 8 g/kg pour les années normales (p50%) et 9 g/kg pour les années sèches (p10%). Hiernaux & Diarra (1983) évaluent la production pendant la saison sèche à 300-500 kg/ha. Le taux d'azote de cette nouvelle croissance a une moyenne de 10 g/kg de matière sèche (Traoré, 1978).

La sécheresse de 1984 allant de pair avec l'exploitation intensive des graminées pérennes, également pendant la période de croissance principale, a occasionné dans le delta, une très grande mortalité de ces graminées. Au cours de l'extrême sécheresse de l'année 1984, la production n'a pas dépassé 2500 kg/ha, alors que, dans les années 1985 et 1986 la production n'a pas dépassé 3500 kg/ha (ILCA, 1987). Ces chiffres sont résumés dans le tableau I.13. Pour d'autres utilisations de l'évaluation de la production végétale, c'est la situation actuelle qui sert de base : la régénération de la végétation pérenne est possible, certainement avec une politique de plantation active, mais peut se faire attendre pendant des années.

Tableau I.13
Production végétale et taux d'azote dans le Delta vif (Mali) pour les années normales (p50%) et sèches

(p10%).

	croissance principale		repousse	
	production (kg/ha)	taux d'azote (g/kg)	production (kg/ha)	taux d'azote (g/kg)
avant 1984 :				
p50%	6500	8	400	10
p10%	4500	9	200	10
après 1984 :				
p50%	3500	10	200	10
p10%	2500	11	100	10

I.2.5. Disponibilité fourragère

L'évaluation dans le chapitre précédant de la production et de la qualité des pâturages, est insuffisante pour définir la situation fourragère : toute la production n'est pas disponible pour le bétail. Tant qu'il n'est pas question de moissons, de conservation et de stockage, les pertes seront nombreuses. Les causes de ces pertes ont déjà été nommées : voracité (termites, sauterelles, etc.), feux, piétinement, moisissures, etc.

En ce qui concerne la strate herbacée, Hiernaux (communication personnelle) estime que la biomasse diminue deux fois plus vite que ne le laisse supposer la quantité broutée, lorsque la pâture s'effectue pendant la saison des pluies : l'ingestion réelle ne représente que 50 % de l'ingestion apparente. Lorsque la pâture s'effectue tout le long de l'année, ce pourcentage est même de 35 %, une valeur donnée également par Toutain & Lhoste (1978) pour le nord du Burkina Faso. Aussi avec la méthode actuelle, la part de la production annuelle effectivement consommée, est estimée à 35 %. Ce pourcentage risque de diminuer encore par suite des feux ; dans la savane, où la production annuelle est d'au moins 2000 kg/ha et où les feux ne sont pas contrôlés, l'ingestion réelle n'est estimée qu'à 20 %.

Pour la disponibilité du fourrage ligneux, l'accessibilité joue un rôle important. On estime qu'au Sahel, sans l'intervention des bergers, 25 % au maximum de la production annuelle de feuilles et de rameaux peuvent être consommés, alors que ce pourcentage est de 15 % en savane. La chute des fruits les rendra finalement accessibles, mais ils seront alors soumis aux même phénomènes de pertes que la strate herbacée. Ceci vaut également pour les feuilles tombées au cours de la saison sèche, au moment où le fourrage ligneux est important, du moins pour les bovins. On estime que les feuilles vertes encore portées par les arbres ou les arbustes, ne représentent sur toute la période sèche que 30 % de la production annuelle totale.

On peut déduire de ce qui précède une évaluation totale de la disponibilité en fourrage, en prenant 35 % de la production annuelle de la strate herbacée et du fourrage ligneux figurant au tableau I.7. Lorsqu'il s'agit uniquement de fourrage ligneux de la savane, 25 % de la production annuelle est plus réaliste. Les valeurs ainsi obtenues constituent la base de I.3.3.2.

Le terme de disponibilité en fourrage, utilisé ici, se réfère à la quantité de produit qui peut être consommée potentiellement par le bétail dans la forme actuelle d'exploitation. On n'a pas cherché à savoir si du point de vue de la durabilité de la production, il est souhaitable d'utiliser le pourcentage indiqué de la production annuelle, ni si la qualité et la répartition de la qualité sont telles qu'elles sont intéressantes pour la production animale (I.3.4).

La qualité du fourrage disponible n'est pas égale à la qualité moyenne de la matière végétale produite. Les pertes par voracité et moisissures affectent plutôt la matière de bonne qualité ; les pertes par le feu touchent la matière de qualité inférieure, car le feu attaque plutôt les herbes et la matière sèche (basse qualité) que les dicotylédones et la matière verte (haute qualité). Ces processus sont complexes, aussi pour des estimations globales telles que celles données ici, il n'est pas possible d'en tenir compte séparément. La qualité moyenne du fourrage disponible et son évolution dans le temps, est par conséquent considérée comme étant égale à celle de la biomasse végétale produite.

Si une sélection paraît possible compte tenu de la pression animale par rapport à la disponibilité en fourrage, il faut alors pour obtenir une meilleure appréciation de la production animale, présenter séparément la matière de qualité relativement élevée. C'est pourquoi la production de graminées pérennes et de feuilles vertes d'espèces ligneuses pendant la saison sèche a été présentée séparément dans la section précédente.

I.3. Elevage de la région : possibilités et limites

I.3.1. Introduction

Après avoir présenté le climat, le sol et la végétation des pays sahéliens, ainsi que les processus qui lient ces éléments de leur écosystème, un quatrième élément est abordé : le bétail, et plus particulièrement l'élevage bovin.

Quelle est la productivité de l'élevage bovin dans les pays sahéliens ? Quelle peut être sa productivité compte tenu des limites imposées par la quantité et la qualité du fourrage disponible ? Quelles sont les limites imposées par le potentiel génétique des races existantes et le niveau des services sanitaires ? Quelle est la productivité des pâturages en termes de production animale ? Quelles sont les différences entre la capacité de charge des différents types de pâturages et de production par tête de bétail ? Existe-t-il des différences avec des régions à pluviométrie égale ailleurs en Afrique ? Et finalement, quelle est la productivité des systèmes d'élevage compte tenu des différences au niveau de l'alimentation et de la gestion ? Voici les questions auxquelles ce chapitre tentera de répondre.

L'analyse se concentrera sur l'élevage bovin. Diverses raisons justifient ce choix. Les bovins forment quantitativement la catégorie la plus importante du cheptel total des pays sahéliens. En 1982 le pourcentage de bovins, exprimé en UBT (unité bovine tropicale, c'est-à-dire un animal standard pour les tropiques, pesant 250 kg), était estimé à 58 % pour le Niger, 72 % pour le Mali et 81 % pour le Burkina Faso (Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987). Par ailleurs, la connaissance des systèmes d'élevage bovin est plus répandue que celle des autres productions animales. Il en résulte plus de possibilités de comparaison avec les autres régions. Finalement, il a semblé plus judicieux d'analyser de façon approfondie une seule branche de l'élevage, plutôt que de donner un aperçu général de l'éventail de toutes les activités d'élevage.

I.3.2. Race, alimentation et couverture sanitaire

L'élevage est basé sur un certain nombre de piliers : présence de races animales adaptées, d'eau d'abreuvement, de moyens d'alimentation appropriés, et protection plus ou moins efficace contre les maladies et les épidémies. Par ailleurs, des facteurs socio-économiques déterminent la forme et le fonctionnement de l'élevage. Seuls, les premiers facteurs cités seront traités ici, c'est-à-dire les facteurs à caractère technique.

Les caractéristiques d'une race, l'alimentation et les mesures de santé, sont autant de facteurs qui rendent la production possible, tout en délimitant le niveau de cette production. En fonction de la situation existante, ces facteurs revêtent un ordre d'importance par lequel elles limitent la productivité du bétail. Ainsi, pour une situation où l'alimentation et les soins de santé sont optimaux, les caractéristiques de la race détermineront finalement la production potentielle par tête de bétail. C'est ce qu'on appelle le potentiel génétique des races présentes.

En ce qui concerne les bovins sahéliens, ce potentiel est globalement connu grâce, notamment, aux résultats obtenus dans diverses stations expérimentales. Ces recherches ont permis une conclusion importante : les races locales dans les systèmes d'élevage courants produisent bien moins que leur potentiel génétique. Le tableau I.14 donne une indication quant à la différence entre la productivité actuelle et la potentialité génétique. Une telle image est nécessairement grossière : les races locales diffèrent en ce qui concerne leur potentialité génétique, et de plus, la productivité de l'élevage bovin local n'est pas uniforme. Néanmoins, ce tableau donne une première impression de l'accroissement de la productivité envisageable dans le cas d'une meilleure alimentation et de soins de santé accrus. I.3.6 traitera plus en détails de ce sujet.

Tableau I.14
Comparaison du potentiel génétique des races de bovins en provenance des pays sahéliens avec la productivité actuelle de l'élevage extensif.

---

	potentiel génétique	productivité actuelle

vitesse de croissance (kg/jour)	0,75	0,07-0,15
âge au premier vêlage (mois)	30	40-66
intervalle de vêlages (mois)	12	17-24
production de lait (kg par lactation)	1000-2000	500-800

Comparé aux races bovines européennes, la potentialité génétique des races des pays sahéliens est inférieure sur un certain nombre de points : ainsi les races européennes de bétail laitier peuvent fournir plusieurs fois la quantité de lait maximum fournie par les vaches azawak, soit 2000 litres par an. Une telle comparaison n'est cependant d'aucune utilité dans la pratique : tant que la production de lait par vache est déterminée en premier lieu par l'offre en aliments, l'introduction de races exotiques avec un potentiel de production élevé n'est pas opportun. La question se pose même de savoir si ces races peuvent résister à des conditions auxquelles elles ne sont pas adaptées. On en arrive ainsi à un second aspect du potentiel génétique des races, notamment la capacité à survivre et à produire dans un environnement qui, à de nombreux égards, est sous-optimal (alimentation, climat et service santé).

L'élevage dans les pays sahéliens a besoin de races adaptées, pouvant produire davantage dans les limites données. Il semble presque illogique de rechercher ces races loin des pays sahéliens : les races locales ont en effet évolué sous les pressions extérieures pour en arriver à leur stade actuel. Les expériences faites dans d'autres régions semi-arides, ont prouvé que les races *Bos indicus* sont plus satisfaisantes que les *Bos taurus*. Dans le nord de l'Australie, l'introduction de sang brahman s'est avéré être un moyen important pour stimuler la productivité du cheptel, qui auparavant se composait principalement de bétail shorthorn (Winter et al., 1985) ; dans l'ancienne Rhodésie, on savait depuis longtemps que dans des conditions extensives les races européennes sont moins productives que les races locales (Ward, 1978).

Il est donc plus logique d'opérer une sélection parmi les races existantes dans les pays sahéliens, afin d'élever ainsi des animaux plus productifs. Cette méthode est appliquée depuis un certain temps déjà, dans diverses stations expérimentales. Les résultats obtenus sont cependant décevants. Les résultats obtenus par deux stations expérimentales illustrent cet état de fait : Niono au Mali, où la sélection s'est effectuée à partir de zébu peul et de zébu maure, et Toukounous au Niger, où la sélection a porté sur le zébu azawak. Du point de vue des poids enregistrés pour les différentes catégories d'âge, la sélection seule ne semble pas mener à une progression de la productivité (figures I.13 et I.14).

Figure I.13

Evolution du poids moyen du zébu azawak, dans les différentes classes d'âge, à la station expérimentale d'élevage à Toukounous au Niger.

[rond noir]——[rond noir] : 0 mois ; x——x : 6 mois ; o—— o: 12 mois ; +——+ : 24 mois.

Figure I.14

Evolution du poids moyen du zébu peul et du zébu maure dans les différentes classes d'âge à la à Niono au Mali.

[rond noir]——[rond noir] : 0 mois ; [losange]——[losange] : 3 mois ; x——x : 6 mois ; o—— o : 12 mois ; +——+ : 24 mois.

Cette situation est peut-être due en partie à des défaillances dans la méthode de sélection et à la gestion défectueuse des troupeaux, mais pour une part importante, ce sont les problèmes inhérents à la situation générale qui jouent un rôle : puisque la production dépend en premier lieu de la qualité de l'alimentation, il s'agit de créer une race plus efficace, et il semble qu'il s'agisse là d'un processus difficile et de longue durée. Par contre, l'amélioration de la qualité de l'alimentation peut entraîner à brève échéance une augmentation substantielle de la productivité. C'est là la cause de l'augmentation de la productivité dans les premières années d'existence de la plupart des stations expérimentales : par l'achat de produits comme les graines de coton et la mélasse, il a été possible de dépasser rapidement le niveau de l'élevage local.

C'est ce qui s'est passé à Niono et Toukounous, ainsi qu'à l'ancien « centre National de Recherches Zootechniques de SOTUBU » au Mali, lors d'essais d'amélioration de la production de lait, par introduction de races exotiques. Il ressort de l'analyse de Tamboura et al. (1982), que, malgré l'importation d'une grande diversité de races, seule une année a vu la production par vache dépasser le niveau de 1500 kg par lactation, pendant la période de 1966-1978.

La qualité des fourrages disponibles explique la productivité de l'élevage bovin dans les pays sahéliens. Les effets d'une couverture sanitaire faible sont plus difficiles à quantifier.

Les soins sanitaires servent en premier lieu à prévenir les pertes de production dues aux décès. Ces mesures comportent la vaccination contre les principales maladies virales et bactériennes : la peste bovine, la péripneumonie contagieuse des bovidés, la pasteurellose, le charbon symptomatique, le charbon bactéridien et la peste des petits ruminants. Dans le passé, ces campagnes de vaccination se sont montrées efficaces pour repousser la mortalité en masse due aux épidémies : elles ont ainsi permis d'augmenter la productivité. Leur efficacité pour l'augmentation de la productivité diminue cependant à mesure que l'on approche une situation où la disponibilité et la qualité de l'alimentation sont déterminantes pour la production. Quoi qu'il en soit, l'utilité des campagnes de vaccination demeure.

Un autre aspect des soins de santé concerne le combat contre la perte de productivité par les affections parasitaires : les maladies transmises par les tiques, les parasites de l'appareil gastro-intestinal et la trypanosomiase. Les pertes de productivité dues à ces affections ne peuvent être estimées, car les données nécessaires à cette estimation font défaut.

La lutte pour l'amélioration de la production de l'élevage bovin, ne peut être jugée que sur son efficacité. Ceci exige pour chaque situation une nouvelle analyse précise des points difficiles. Ces points difficiles varieront en fonction de la situation selon le sérieux et la priorité de l'intervention. Il est rare que les points difficiles se limitent à un seul aspect du système de production, mais même lorsque c'est le cas, la solution du problème exige une approche intégrale où l'augmentation de la production grâce à une meilleure alimentation doit être garantie par des soins vétérinaires effectifs, et valorisée par des débouchés garantis.

Ce manuel met l'accent principalement sur le rôle de l'alimentation dont le rôle revêt une très grande importance pour l'élevage dans les pays sahéliens.

I.3.3. Disponibilité et qualité fourragère

I.3.3.1. Une première impression

Dans les pays sahéliens quantités et qualité des fourrages disponibles limitent la production du bétail. Il n'est pas possible de se limiter aux produits des pâturages naturels ; les sous-produits agricoles jouent également un rôle important dans l'alimentation du bétail. L'importance de cette alimentation comparée à celle des pâturages naturels peut être analysée à divers niveaux. L'analyse sur le plan national permet de connaître le budget des fourrages quand la répertorisation en est faite par pays. Ces calculs ont été effectués dans le cadre d'une analyse de la situation de l'élevage au Niger, au Mali et au Burkina Faso (Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987).

Le tableau I.15 donne une vue générale des différents pays. On distingue quatre types de fourrages : la biomasse aérienne de la strate herbacée, les feuilles, les rameaux et les fruits des espèces ligneuses, et les sous-produits agricoles, de qualité médiocre et très bonne (paille des légumineuses, farines basses, tourteaux de coton, tourteaux d'arachides et mélasse).

Tableau I.15
Disponibilité totale en fourrage calculée pour une année normale, et part relative (fraction du total) de quatre catégories de fourrage au Niger, Mali et Burkina Faso.

	total (À 10^6 tonnes)	part relative			
		strate herbacée	fourrage ligneux	sous-produits agricoles	
				faible qualité	bonne qualité
Niger	27,5	0,64	0,11	0,21	0,04
Mali	77,4	0,71	0,22	0,06	0,01
Burkina Faso	28,9	0,67	0,24	0,07	0,02

Suivant Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987.

Ce tableau concerne la disponibilité en fourrage définie dans I.2.5 : la quantité de produit en principe consommables, soit la production annuelle corrigée par l'accessibilité et les pertes. Pour les produits agricoles de basse qualité, le pourcentage de pertes est estimé identique à celui de la strate herbacée (65

%) ; pour les fanes des légumineuses - qui sont récoltées et conservées - les pertes sont estimées à 40 %, et pour les sous-produits des semences (farines basses, tourteaux) et la mélasse à 20 %.

Le tableau I.15 montre que, pour les trois pays concernés, les produits des pâturages naturels (herbes, graminées + fourrage ligneux) représentent l'essentiel de la disponibilité totale du fourrage. Mais les sous-produits agricoles jouent un rôle non négligeable. Il est étonnant de constater que le Niger, où il n'y a pratiquement pas de savane, est, en pourcentage, le pays avec la plus grande disponibilité en sous-produits agricoles : de grandes parties du sud du Sahel y ont été mises en culture.

Les données de ce tableau ne revêtent toute leur signification que lorsque les quantités et la qualité du fourrage sont considérées par rapport à la population animale à qui il est destiné.

La somme des quantités disponibles de matière sèche des différents produits donne une idée de la disponibilité en fourrage par superficie ou par tête de bétail. Mais elle ne donne aucune idée de la production envisageable : la matière sèche digestible provenant de la paille n'a en effet pas la même « valeur » que celle provenant des fourrages concentrés. En moyenne, un ruminant ne mangera du premier produit que ce qui lui est nécessaire pour l'entretien, alors qu'il ingérera une quantité beaucoup plus importante du second. La disponibilité en matière sèche digestible provenant de la paille ne donne donc pas, ou peu, lieu à une production animale, quelles que soient les quantités disponibles. Par contre la disponibilité en matière sèche digestible, provenant de fourrage de meilleure qualité, se répercute sur la production, à condition que la quantité disponible par tête soit suffisante.

Les fourrages de bonne qualité présentent un taux élevé de substances nutritives, ingérés dans une large mesure par le ruminant ; l'inverse est vrai pour les fourrages de mauvaise qualité.

Pour la période des pluies, on peut affirmer grosso modo que la strate herbacée des pâturages naturels varie entre une qualité très bonne à moyenne (I.2.4) ; pour la saison sèche, la qualité varie de moyennement bon à très mauvais, comme la qualité de la paille céréalière ; pour les bovins, des sous-produits agricoles de bonne qualité, et dans une moindre mesure, le fourrage ligneux, peuvent constituer un complément à cette ration de saison sèche. L'apport du fourrage ligneux au menu des bovins n'est pas bien connu ; d'une manière générale, il semble cependant surestimé. Voilà pourquoi le tableau I.16 indique d'une part la disponibilité totale de fourrage par UBT, et d'autre part la disponibilité en sous-produits agricoles de bonne qualité.

Le premier chiffre donne une idée de la présence ou de l'absence de pénuries absolues de fourrage ; le second indique le rôle (potentiel) des suppléments en provenance de l'agriculture actuelle. La colonne suivante indique le pourcentage des besoins en énergie qui pourrait être couvert par ces derniers produits. Au Niger notamment cet élément n'est pas insignifiant. Même en prenant en ligne de compte qu'une grande partie de ces produits (par exemple farines basses), ne sont pas, dans la pratique, destinés aux ruminants, leur apport peut être important.

Tableau I.16

Volume du cheptel national en rapport avec la disponibilité annuelle totale en fourrage, la disponibilité annuelle en sous-produits agricoles de bonne qualité et la contribution potentielle de ces produits aux besoins en énergie en tant que fraction de la totalité des besoins.

	cheptel (À 10^3 UBT)	disponibilité totale en fourrage (kg/UBT)	disponibilité en sous-produits de bonne qualité	
			(kg/UBT)	contribution aux besoins en énergie
Niger	2776	9900	396	0,26
Mali	7360	10500	84	0,05
Burkina Faso	2303	12500	264	0,17

Suivant Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987.

Ainsi, dans les conditions actuelles, un supplément qui permet d'augmenter de 10 % l'assimilation totale en énergie, peut doubler la production bovine. Un tel accroissement de la productivité tient au fait qu'à un bas niveau de production, pratiquement toute l'énergie ingérée est utilisée à des fins d'entretien : la survie de l'animal et, au niveau du troupeau, le remplacement des animaux morts. Cela signifie que très peu de l'énergie assimilée est disponible pour la production. Si les éleveurs parviennent à élever de quelques pour-cent l'ingestion totale en énergie en ayant recours aux suppléments de fourrage, cela aura un effet relativement important sur la quantité d'énergie disponible pour la production.

En supposant un besoin alimentaire d'environ 2000 kg de matière sèche par UBT et par an, il semble - compte tenu de la disponibilité totale - qu'il n'y ait pas de manque de fourrage dans l'un des trois pays. On verra, par la suite, que cette conclusion doit être fortement nuancée : le tableau I.16 représente la situation d'une année moyenne et ne tient pas compte de la répartition géographique du fourrage et du bétail, ni des limites de la mise à profit du fourrage qui découlent d'une qualité trop faible d'une partie de la totalité disponible. De plus, les pertes de fourrage dues aux feux ne sont pas prises en considération. Une meilleure compréhension de la disponibilité exige par conséquent de différencier :
- la situation pendant les années moyennes et sèches ;
- la zone climatique, la région et le système d'élevage ;
- la qualité des aliments disponibles.

Ces nuances sont reprises ci-dessous et débouchent sur une analyse de la capacité de charge des pâturages dans les pays sahéliens, à laquelle est consacrée I.3.4 .

I.3.3.2. Situation par zone climatique

I.2.5 explique comment calculer la disponibilité en fourrage à partir du tableau I.7. La précision de ce tableau permet de différencier les zones climatiques et les années de pluviosité moyenne et les années sèches. Pour obtenir une vue d'ensemble par zone climatique, la production moyenne pondérée a été calculée sur la base de la part relative de surface des divers ensembles (tableau I.17). En l'absence de données quantitatives sur le recouvrement par les espèces ligneuses pour les unités Os et Ps pour la zone soudanaise, il n'a pas été possible de calculer leur production en arbres et en strate herbacée. C'est pourquoi les unités Os et Ps pour la zone soudanaise ont été regroupées avec l'unité Sq. Un tel choix est justifié par le fait que les sols sablonneux dans la savane sont souvent peu profonds et présentent ainsi des affinités avec l'unité Sq.

Tableau I.17
Part de surface (fraction de la surface totale) des différentes unités de paysage par zone climatique.

unité de paysage	nord du Sahel	sud du Sahel	nord de la savane	sud de la savane
Os + Ps	0,65	0,35	0,25	0,15
Pl	0,05	0,10	0,20	0,30
La	0,05	0,20	0,15	0,10
Sq	0,25	0,35	0,40	0,45

Le tableau I.18 indique la disponibilité fourragère totale et la contribution moyenne du fourrage ligneux et de la strate herbacée par zone, pour une année normale et une année sèche. Le tableau I.19 précise l'effet d'années de sécheresse sur la disponibilité en fourrage. L'effet de la sécheresse dans le nord du Sahel est beaucoup plus important sur la strate herbacée que sur les espèces ligneuses. Dans la zone soudanaise, l'effet de la sécheresse sur les espèces ligneuses est un peu plus importante que sur la strate herbacée, alors que dans le sud du Sahel, l'effet est presque identique sur les deux composantes. Cette différence de réaction face à la sécheresse résulte de la méthode de calcul (I.2.4). Lors du calcul de la production de la strate herbacée, on suppose que dans les zones à plus grande pluviosité, une pluviosité plus forte ou moins forte influence peu la production (croissance limitée par les éléments nutritifs). Les calculs de la production des espèces ligneuses sont effectués à l'aide d'une relation proportionnelle, découverte au Sahel, entre la production et la pluviosité (Bille, 1977) sur tout le trajet nord-sud. Cette relation n'est pas nécessairement applicable aux zones à forte pluviosité où il est possible que l'effet de la sécheresse sur les espèces ligneuses soit négligeable (III.2.6).

Tableau I.18
Disponibilité annuelle totale en fourrage (kg/ha) et part de la strate herbacée et du fourrage ligneux en

fonction du total, par zone climatique et pendant des années normales (p50%) et sèches (p10%).

	nord du Sahel		sud du Sahel		nord de la savane		sud de la savane	
	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%
total	250	50	800	500	1000	800	1200	1050
strate herbacée	0,92	0,80	0,80	0,80	0,59	0,62	0,60	0,61
fourrage ligneux	0,08	0,20	0,20	0,20	0,41	0,38	0,40	0,39

Tableau I.19
Disponibilité en fourrage pendant une année sèche en tant que fraction de la disponibilité en fourrage pendant une année normale.

	nord du Sahel	sud du Sahel	nord de la savane	sud de la savane
total	0,18	0,65	0,81	0,88
strate herbacée	0,15	0,63	0,83	0,89
fourrage ligneux	0,47	0,64	0,75	0,88

Pour finir, le tableau I.20 donne une vue d'ensemble de la qualité du fourrage à partir du taux d'azote, tel que décrit dans I.2.4. Une moyenne pondérée a été calculée pour l'ensemble de la saison sèche, en tenant compte qu'au début de cette saison, le taux d'azote baisse encore (tableau I.22). Cette moyenne pondérée servira au calcul de la capacité de charge (I.3.4).

Tableau I.20
Taux d'azote (g/kg) par zone climatique au cours de la saison sèche, des années normales (p50%) et et des années sèches (p10%), pour la totalité du fourrage des pâturages naturels et séparément, pour la strate herbacée et le fourrage ligneux.

	nord du Sahel		sud du Sahel		nord de la savane		sud de la savane	
	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%
fin de la saison de croissance :								
total	14,9	21,8	11,0	12,1	10,3	10,7	9,5	9,7

strate herbacée	14,6	22,7	9,4	10,7	6,8	7,8	5,5	6,0
fourrage ligneux	18,2	18,2	17,5	17,5	15,4	15,4	15,4	15,4
fin de la saison sèche								
total	8,0	11,4	6,6	7,1	6,7	6,8	6,3	6,4
strate herbacée	7,7	11,3	5,4	6,0	4,3	4,7	3,7	3,9
fourrage ligneux	12,0	12,0	11,6	11,6	10,2	10,2	10,2	10,2
moyenne pondérée de la saison sèche:								
total	10,3	14,9	7,6	8,1	7,9	8,0	7,5	7,7
strate herbacée	9,9	14,9	5,9	6,5	4,5	5,0	4,0	4,5
fourrage ligneux	15,1	15,1	14,6	14,6	12,8	12,8	12,8	12,8

Les éléments les plus importants des tableaux I.18 à I.20 peuvent être résumés ainsi :

Le nord du Sahel n'est pas seulement caractérisé par une faible disponibilité en fourrage par hectare, mais plus encore par les variations de disponibilités d'une année sur l'autre. Pendant une année sèche, la disponibilité totale représente 18 % de celle des années moyennes. La production des espèces ligneuses est moins sensible aux variations de la pluviosité, mais la contribution des espèces ligneuses à la disponibilité totale en fourrage est peu importante (8 et 20 % pour une année moyenne et une année sèche). Leur influence stabilisatrice sur la disponibilité en fourrage d'une année sur l'autre est donc également limitée. Les différences de disponibilité en fourrage sont très importantes d'un ensemble à un autre. La disponibilité totale en fourrage est surtout déterminée par la production des unités Os et Ps à sols sablonneux, le type de sol le plus répandu dans cette zone.

Les taux d'azote du fourrage de la saison sèche sont relativement élevés, et il en va par conséquent de même pour la qualité du fourrage. Les années sèches ont, il est vrai, un effet négatif sur la disponibilité du fourrage, mais exercent un effet positif sur la qualité de la saison sèche.

Comparée au nord du Sahel, la disponibilité en fourrage par hectare est beaucoup plus élevée dans le sud du Sahel et les variations d'une année à l'autre y sont plus faibles : la disponibilité pendant une année sèche représente 65 % d'une année moyenne. Le rôle des espèces ligneuses y est plus grande que dans le nord du Sahel, mais limité du point de vue absolu (20 % de la disponibilité totale du fourrage). Les différences de la disponibilité en fourrage entre les ensembles sont relativement faibles, en partie parce que les différences dans la production de la strate herbacée sont compensées par des différences dans la production des espèces ligneuses. Aucune unité ne revêt une position dominante.

Les taux d'azote de la strate herbacée pendant la saison sèche sont considérablement moins importantes que dans le nord du Sahel et il en va de même pour la qualité du fourrage. Ici également, la qualité est meilleure pendant les années de sécheresse.

Dans le nord de la zone soudanaise, la disponibilité en fourrage continue à augmenter ; la différence avec le sud du Sahel est cependant moins importante qu'entre le nord et le sud du Sahel. Par contre les variations d'une année sur l'autre sont beaucoup moins accentuées. Les espèces ligneuses assurent une part importante de la disponibilité totale en fourrage, la disponibilité en fourrage herbacé est à peu près égale à celle du sud du Sahel. Les sols peu profonds jouent un rôle important.

La tendance du nord au sud à la baisse de la qualité du fourrage se poursuit dans la zone soudanaise.

Le sud de la zone soudanaise présente de nombreux traits communs avec le nord de la zone soudanaise : l'offre limitée d'éléments nutritifs détermine le potentiel de la production et la qualité du fourrage, tant pendant les années sèches que pendant les années humides.

Outre les différences de disponibilité en fourrage en fonction des zones, il existe des différences régionales qui sont liées à la présence de l'agriculture et à celle des plaines d'inondation. Les effets diffèrent : l'agriculture peut fournir des sous-produits, compléments utiles à la ration de la saison sèche ; par ailleurs ce sont justement les meilleures terres qui sont de plus en plus soustraites à l'élevage. De surcroît, les véritables produits de qualité sont destinés à la consommation humaine, alors que la disponibilité en éléments nutritifs pour la production agricole n'est pas ou à peine plus grande sur les champs que sur les pâturages naturels compte tenu de l'utilisation minimale d'engrais chimiques. Les plaines d'inondation telles que le delta du Niger au Mali ont depuis longtemps exercé une grande influence sur la productivité de l'élevage dans les pays sahéliens ; mais là aussi, l'agriculture extensive entraîne une diminution de leur importance. Ce phénomène s'accentue depuis le début de la sécheresse, à cause du surpâturage intensif.

I.3.4. La capacité de charge des pâturages

La disponibilité en fourrage n'a pas de valeur éternelle. Tout dépend de la manière dont les pâturages naturels et les champs sont exploités. C'est pourquoi la capacité de charge est un paramètre important dans l'évaluation des pâturages. La capacité de charge indique le nombre d'animaux qui peuvent être alimentés par unité de surface, de telle manière que la production par animal atteigne un niveau déterminé tout en préservant la capacité de production des pâturages. Une densité trop grande d'animaux par hectare menace la production par animal et même sa survie, et il en résulte, d'une manière générale, une dégradation des pâturages. Une trop faible densité d'animaux par hectare manifeste une sous-exploitation du potentiel naturel des pâturages.

Dans ce manuel, le critère choisi pour déterminer la capacité de charge, est le potentiel actuel du sol sous les climats présents, compte tenu de la disponibilité en azote pour la production végétale. La disponibilité fourragère, qui a été estimée pour déterminer la capacité de charge, en est une dérivée. Cette disponibilité détermine le nombre d'animaux pour lesquels la matière sèche existe en suffisance. Si ce critère est le seul considéré, on obtient une estimation de la limite supérieure de la capacité de charge : en aucun cas 1 hectare ne pourra alimenter un plus grand nombre d'animaux. Pour simplifier la capacité de charge ainsi établie sera appelée la capacité de charge théorique maximum. La capacité de

charge réelle peut cependant être inférieure, et ce pour deux raisons :
- la qualité moyenne de la matière sèche est insuffisante pour assurer la productivité requise des animaux ;
- à longue ou à courte échéance, l'occupation des pâturages en question porte atteinte à la production du fourrage.

Pour le premier point, il est important de savoir que la matière végétale est le plus souvent hétérogène, qu'elle se compose de différents éléments ayant chacun leur qualité caractéristique. Il suffit de penser à la différence entre la feuille et la tige des plantes, entre les graminées, les légumineuses et les autres herbes et espèces ligneuses. La biomasse totale, à la fin de la période des pluies, se compose le plus souvent d'une part importante de matière de basse qualité, et d'une partie minime de qualité meilleure. Il en va de même pour les résidus végétaux des champs céréaliers. En moyenne, le taux d'azote n'y est que de 5 g/kg juste après la récolte, mais il existe une nette différence entre d'une part la feuille des céréales et les mauvaises herbes présentes, avec un taux d'azote de 8 g/kg et, d'autre part, la tige des céréales avec seulement 3 g/kg. Face à cette hétérogénéité, les ruminants réagissent en mangeant sélectivement les feuilles et les mauvaises herbes et en négligeant la tige. Le menu est par conséquent meilleur que ne le laisse supposer la composition moyenne de la biomasse, et par conséquent la productivité est meilleure également. Ceci n'est cependant possible qu'à condition qu'une grande partie de la biomasse reste inutilisée.

Un certain nombre de conséquences pour la capacité de charge des pâturages dans les pays sahéliens en découle. Sur la base d'un taux minimum d'azote exigé de 7,5 g/kg dans le menu (III.3), le taux moyen d'azote dans la strate herbacée dans le nord et le sud de la zone soudanaise est trop bas pendant la saison sèche. Ceci vaut aussi bien pour les années moyennes que pour les années sèches, si tout le fourrage disponible est consommé (tableau I.20).

La consommation de fourrage avec un niveau d'azote aussi bas, entraîne une perte de poids, phénomène normal pour le bétail pendant la saison sèche. Il s'agit là d'un phénomène acceptable tant qu'il reste à l'intérieur de certaines limites : quoi qu'il en soit, une partie du gain de poids réalisée pendant la période des pluies doit rester acquise. Ceci n'est possible que si les animaux peuvent sélectionner ; s'ils sont obligés de consommer du fourrage de qualité moyenne, par suite d'une occupation des pâturages qui correspond à la disponibilité totale du fourrage, la perte en poids sera identique ou même supérieure au gain de poids pendant la saison des pluies. Des exemples seront donnés dans I.3.5.

Des animaux qui n'exploitent que le fourrage ligneux (ligniphiles) obtiendront partout un menu à un taux en dessus de la valeur minimum de 7,5 g/kg (tableau I.20). C'est également le cas pour les espèces qui arrivent à exploiter intégralement le total du fourrage disponible. Mais s'agit-il des herbivores qui exploitent de préférence la strate herbacée, comme les bovins, ce n'est que dans le nord du Sahel où aucune sélection n'est nécessaire en ce qui concerne le taux d'azote ; même à la fin de la saison sèche après une saison à pluviosité moyenne le taux y est encore 7,7 g/kg. Malgré le fait que dans le sud du Sahel le taux moyen pondéré d'azote de la strate herbacée est en dessous de 7,5 g/kg, la capacité de charge théorique maximum est déterminée par les années sèches. Si elle est respectée, il en résulte une

occupation relativement faible des pâturages garantissant ainsi assez de possibilités de sélection de fourrage de qualité suffisante pour la saison sèche consécutive à des années moyennes.

Dans le nord et le sud de la zone soudanaise la capacité de charge des pâturages pour les espèces qui préfèrent la strate herbacée, est dépendante d'une fraction de la disponibilité totale en fourrage herbacé. La quantité de graminées et d'herbes qui conserve au moins un taux d'azote minimum de 7,5 g/kg pendant la saison sèche, détermine donc en principe le nombre de bovins par hectare pouvant pâturer tout le long de l'année. Cette quantité est, dans une année normale, inférieure à la disponibilité totale en fourrage herbacé d'une année sèche. Pour la capacité de charge totale, il faut encore tenir compte de la disponibilité en fourrage des espèces ligneuses, dont par exemple les chèvres et les dromadaires pourraient profiter.

Ces divers éléments permettent une estimation réaliste de la capacité de charge des pâturages pour une population d'herbivores entièrement dépendante des produits de ces pâturages naturels de la zone soudanaise. La différence entre la capacité de charge calculée ainsi, et la capacité de charge théorique maximum, peut être supprimée ou diminuée en utilisant pendant la saison sèche des suppléments de fourrage ou en émigrant vers d'autres régions à pâturages. Dans la pratique les deux stratégies sont appliquées et elles ont un effet important sur la valeur utile des pâturages naturels dans la zone soudanaise.

Sans tenir compte de l'exigence de durabilité (deuxième point : début de ce chapitre), la capacité de charge est estimée par zone pour des situations différentes et sur la base des différents points de départ (tableau I.21). L'objectif consiste à trouver des limites pour la capacité de charge. Une première évaluation est faite sur la base de la disponibilité totale en fourrage pendant une année sèche pour la couverture arbustive actuelle (Ia) : pour le nord et le sud du Sahel il s'agit là d'un point de départ réaliste compte tenu des grandes variations dans la disponibilité en fourrage entre les années sèches et les années moyennes. Pour la zone soudanaise, la différence entre les années sèches et les années moyennes est restreinte et c'est pourquoi il est moins important que les calculs soient effectués pour une année sèche ou une année moyenne. La superficie nécessaire par UBT correspond alors à une moyenne de 45,5, 3,9, 2,5 et 1,9 ha/UBT pour respectivement le nord du Sahel, le sud du Sahel, le nord et le sud de la zone soudanaise.

Tableau I.21
Estimations de la capacité de charge des pâturages naturels sur la base de différentes situations de départ :

situation de départ	I			II	
situation	a	b	c	a	b
biomasse animale (kg/km^2):					
nord du Sahel	550			450	

sud du Sahel	6450			5150	
nord de la savane	10200	7800	2500	7150	2150
sud de la savane	13350	8050	2050	9250	2150
densité animale (ha/UBT) :					
nord du Sahel	45,5			56,8	
sud du Sahel	3,9			4,8	
nord de la savane	2,5	3,2	10,0	3,5	11,6
sud de la savane	1,9	3,1	12,1	2,7	11,5

Situation de départ I : situation avec le recouvrement ligneux de la fin des années soixante-dix ;
a) disponibilité en fourrage des strates ligneuse et herbacée pendant une année sèche (p10%) ;
b) disponibilité en fourrage de la strate ligneuse et de la fraction supérieure de la strate herbacée (taux d'azote 7 g/kg) pendant une année normale (p50%) ;
c) disponibilité en fourrage de la fraction supérieure de la strate herbacée pendant une année normale (p50%).

Situation de départ II : situation sans couverture arbustive ;
a) disponibilité en fourrage de la strate herbacée pendant une année sèche (p10%) ;
b) disponibilité en fourrage de la fraction supérieure de la strate herbacée pendant une année normale (p50%).

Pour la zone soudanaise, l'influence du critère de qualité (Ib) formulé précédemment, a ensuite été recherché. La disponibilité en fourrage est à présent calculée pour une année moyenne. La qualité de la strate herbacée étant meilleure pendant les années sèches, une année moyenne représente une situation moins favorable qu'une année sèche. La superficie nécessaire augmente un peu, mais reste assez limitée si l'on tient compte d'une population importante de ligniphiles. Si elle n'est pas présente (Ic) il faut pour les herbiphiles exclusifs 10,0 et 12,1 ha/UBT pour respectivement le nord et le sud de la zone soudanaise, afin de garantir une production minimale.

S'agit-il des bovins, le bétail de loin le plus important dans la savane actuellement, il faut tenir compte d'une certaine exploitation de la strate ligneuse en saison sèche. Ce n'est qu'à peu près 20 % du fourrage ligneux de la savane qui est appété cependant. Le taux moyen d'azote du menu peut devenir ainsi 5,5 et 5,0 g/kg pour le nord et le sud de la savane soudanaise, au lieu de 4,5 et 4,0 g/kg de la strate herbacée seule (tableau I.20). La capacité de charge y en liée est respectivement 4,7 et 4,8 ha/UBT.

En résumé, y déterminent trois aspects clés la capacité de charge des pâturages naturels, indépendamment des systèmes de production en question et de la viabilité de ces systèmes :
- La qualité fourragère n'est pas un facteur limitatif pour l'élevage en général dans le nord du Sahel et pour les ligniphiles dans toutes les zones. La capacité de charge est dans ces cas déterminée par la disponibilité fourragère des années sèches.
- La qualité fourragère limite l'élevage des herbiphiles dans le sud du Sahel, sauf dans les années sèches. La variabilité pluvieuse étant encore importante dans la zone, il est à conseiller de faire déterminer la charge du bétail par la disponibilité des années sèches. La possibilité de sélectionner du fourrage de qualité au cours des années moyennes est ainsi garantie.

- La qualité fourragère est tellement limitative pour les herbiphiles dans la savane, qu'elle doit déterminer la capacité de charge de la zone. Le critère « taux d'azote minimum de 75 g/kg » y remplace le critère « disponibilité fourragère des années s èches » des cas précédents.

Le tableau montre une influence nette de la présence de la strate ligneuse dans la zone de la savane, si l'on dispose au moins des espèces qui arrivent à exploiter le fourrage ligneux. Il est indiqué ci-dessus que, même dans le cas des bovins, la capacité de charge est encore à peu près doublée par la présence de la strate ligneuse. Ceci n'implique pas automatiquement que l'abattage des arbres et arbustes dans la savane diminue la capacité de charge. Car la production herbacée augmenterait sans la concurrence des espèces ligneuses, et on doit s'attendre à un remplacement (partiel) des espèces herbacées annuelles par des graminées pérennes. Ceci donnerait un prolongement de la saison de croissance du bétail.

On ne sait pas encore si une occupation des pâturages au niveau estimé de la capacité de charge ne portera pas à terme atteinte à la production du fourrage (deuxième point du début de ce paragraphe). Quelques critères relatifs à cette question seront proposés dans III.4.

Les estimations de la capacité de charge totale, telles que représentées dans le tableau I.21, sont comparées dans la figure I.15 aux données de la charge du bétail dans diverses parties du Niger, du Mali et du Burkina Faso pour l'année 1982 (Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987).

Figure I.15

Comparaison de la biomasse animale relativement élevée dans diverses régions pour l'année 1982, avec la capacité de charge théorique maximum sur la base de la disponibilité fourragère d'une année sèche (tout fourrage ligneux disponible compris ; ——), et avec la capacité de charge basé sur la fraction de la biomasse herbacée d'une année normale, ayant au moins un taux d'azote de 7,5 g/kg (- - - -), sans (— — –) et avec l'influence positive de 20 % du fourrage ligneux disponible (-----).

Les observations individuelles concernent l'estimation de la biomasse animale dans diverses régions pour l'année 1982, Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987 ; [point noir] : Niger ; o : Burkina Faso ; x : Mali.

Avant d'examiner attentivement cette comparaison et de donner une appréciation du degré actuel d'utilisation des pâturages dans les pays sahéliens et compte tenu de l'utilisation durable de ces pâturages, il faut prendre en considération les points suivants :
- Lors du calcul de la disponibilité en fourrage, les pertes par le feu n'ont pas été prises en ligne de compte ; c'est pourquoi dans la zone soudanaise la disponibilité totale en fourrage par rapport aux besoins semble élevée et atteint un niveau tel que la biomasse restante devrait suffire pour protéger le sol contre les dégradations. Les feux forment cependant - là où les graminées pérennes dominent - un outil de gestion indispensable tant qu'il y a insuffisance de sous-produits agricoles de bonne qualité.
- La comparaison est basée sur les terres des pâturages : les terres agricoles n'ont pas été prises en ligne de compte. Mais les terres sont de plus en plus cultivées, ce qui entraîne une augmentation de l'occupation des pâturages. Bien que l'agriculture apporte une contribution à la disponibilité en fourrage pour le bétail, elle est estimée, par unité de surface, à un niveau moindre que les pâturages ; la partie de la production agricole de haute qualité est destinée à la consommation humaine, alors qu'une partie de la

paille est utilisée à des fins autres que l'élevage. L'agriculture extensive actuelle épuise le sol et le dégrade. Sans modification des systèmes de production, les niveaux actuels de la production ne pourront être maintenus.
- Le calcul de l'occupation actuelle tient compte de tous les pâturages, mais non de la plus faible disponibilité en fourrage de pâturages déjà dégradés.

Les considérations ci-dessus permettent de conclure que les estimations présentées de la capacité de charge sont un peu surfaites. Il faut donc en tenir compte lors de l'estimation du degré d'occupation actuel.

Selon la figure I.15, certaines parties du nord et du sud du Sahel présentent des charges de bétail qui s'approchent de la capacité de charge estimée pour les années sèches et la dépassent même à certains endroits. Certaines parties de la zone sahélienne semblent encore sous-utilisées. C'est pourquoi les études citées signalent un manque total de fourrages entraînant le décès du bétail, surtout lors d'une année d'extrême sécheresse (pluviosité de moins de 10 %) telle que 1983/1984. Il ne subsiste donc aucun doute, la charge du bétail dans la zone du Sahel a atteint ses limites : les biomasses animales indiquées pour le nord et le sud du Sahel au Niger, représentent des moyennes par département. Un survol plus détaillé à partir d'un comptage fait d'avion a donné pour une région de 81.550 km2 au nord de Tahoua (nord du Sahel : capacité de charge calculée 550 kg/km2) 1100-1500 kg/km2 pour la période 1981-1982. Au mois de septembre 1985, après la sécheresse de 1983/1984, le chiffre était tombé à 330 kg/km2 (Bourn & Wint, 1986).

Dans le nord et le sud de la zone soudanaise, la charge de bétail est inférieure à la capacité de charge théorique maximum : seule la région du coton dans le sud du Mali fait exception. L'explication en est donné en bonne partie ci-dessus : ce n'est que dans les zones où il y a des suppléments de fourrage (dans ce cas les tourteaux de coton) que la capacité de charge théorique maximum peut être atteinte ; partout ailleurs la faible qualité de la strate herbacée empêche un degré d'utilisation élevé. Compte tenu de la population actuelle du bétail, qui se compose principalement de bovins, la capacité de charge, basée sur la qualité de la strate herbacée pendant la saison sèche, semble être presque atteinte, également dans la zone soudanaise. La charge de bétail diminue en allant plus au sud. Le danger de contagion de la trypanosomiase dans la zone guinéenne en est une explication.

En analysant le tableau I.16, on découvre une autre réalité sous l'apparence de surplus de fourrage par UBT : un manque de fourrage pendant les années sèches dans le nord et le sud du Sahel et un manque de qualité du fourrage dans le nord et le sud de la zone soudanaise.

Les estimations de la capacité de charge des pays sahéliens ont également été comparées avec les données sur l'importance des populations d'herbivores sauvages dans les parcs naturels, et avec les populations d'herbivores sauvages et domestiques dans les régions pastorales ailleurs en Afrique (Coe et al., 1976 ; Bell, 1982 ; Walker et al., 1987).

La pluviosité moyenne annuelle a été choisie comme base de comparaison, base identique à celle choisie

par les auteurs précités. De plus, il a été tenu compte de la différence de fertilité du sol à divers endroits, comme l'avait proposé Bell. Le choix de ces deux caractéristiques a été inspiré par la question de savoir dans quelle mesure l'importance des populations d'herbivores sauvages et domestiqués est déterminée et limitée par l'offre en fourrage. Est-ce d'une manière générale la disponibilité en fourrage qui détermine le nombre d'animaux dans une région donnée, ou bien ce nombre est-il régi par d'autres facteurs (maladies, épidémies, prédateurs et disponibilité en eau) ? Il est clair qu'une réponse à ces questions ne peut être donnée à partir d'une simple corrélation entre la biomasse animale et la pluviosité. Car même si une telle corrélation apparaît, cela ne signifierait pas nécessairement l'existence d'une relation de cause à effet par rapport à la disponibilité en fourrage : la disponibilité en eau potable en provenance d'eaux de surface pourrait également constituer l'explication. Mais la réponse peut être apportée en comparant le besoin en fourrage de la totalité de la population avec la disponibilité en fourrage, tel que cela a été fait ci-dessus pour les pays sahéliens.

Une comparaison de la capacité de charge des pâturages des pays sahéliens avec celle des pâturages naturels ailleurs en Afrique, devrait débuter par une comparaison de la production végétale dans les diverses régions sur la base des précipitations moyennes. Dans quelle mesure les pâturages des pays sahéliens sont-ils plus ou moins productifs que des régions de pluviosité identique ailleurs en Afrique ?

Une telle analyse est rendue difficile par manque de données suffisamment fiables. Différents auteurs ont mentionné dans leurs écrits les relations existantes entre la production et les précipitations. Parfois ces données concernent des variations de rendement suivant des localités de pluviosité différente ; parfois elles concernent des variations de rendement à un même endroit suivant les pluviosités annuelles, et parfois il s'agit d'une combinaison des deux.

Le degré de représentativité des données par rapport à des régions plus vastes est souvent vague. A-t-on tenu compte de la présence de sols dégradés ou à moitié nus et du recouvrement ligneux ?

En tenant compte de ces réserves, les estimations de production de la strate herbacée ont été comparées avec les estimations de la production d'autres régions de pâturage en Afrique (figure I.16). L'impression provisoire est que les pâturages dans les pays sahéliens ont une production de la strate herbacée comparable à celle d'autres régions de pâturages en Afrique, à sols relativement infertiles. Cependant, pour des précipitations annuelles égales, la production de régions à sols volcaniques ou de sols sédimentaires relativement jeunes, peut être considérablement plus importante, grâce à une plus grande fertilité du sol. Cette dernière conclusion n'est pas surprenante compte tenu de tous les résultats des essais d'application d'engrais (I.2.2.2) : seulement pour une pluviosité annuelle très basse (I < 250 mm), la disponibilité en eau est limitative pour la croissance de la strate herbacée. Dans le cas de précipitations plus importantes, c'est la disponibilité en azote et en phosphore qui détermine la production. Le rapport entre la production et la pluviosité devient alors un rapport indirect : la disponibilité des éléments nutritifs et par conséquent la production de la strate herbacée, varie en fonction des précipitations annuelles.

Figure I.16

Comparaison de la relation entre la production de la strate herbacée et la quantité moyenne de précipitations. Sont présentés le Sahel et la zone soudanaise, par rapport à d'autres endroits en Afrique.
—— : désert de Namibie (Seely & Walter, 1986 dans Walter, 1986) ; [carré]—— [carré] : Tuli Lowveld ; [carré noir]—— [carré noir] : Nyamandhlovu Sandveld; [losange]——[losange] : Matopos Sandveld ; [triangle]——[triangle] : Matopos Thornveld (Dye & Spear, 1982) ; [rond noir]——[rond noir] : Serengenti (McNaughton, 1985) ; - - - : moyenne pondérée des productions calculées (ce manuel) de la zone sahélien-savane soudanaise ; [flèche]-----[flèche] : valeurs extrêmes.

Les différences de fertilité du sol ont également des conséquences importantes pour la qualité de la végétation. Il a déjà été démontré que ce facteur aussi influence fortement la capacité de charge. En allant du nord vers le sud dans les pays sahéliens, l'accroissement de la disponibilité en eau va de pair avec une fertilité du sol presque constante. Il en résulte que le nord sec présente une strate herbacée à taux d'azote et de phosphore relativement élevé avec une valeur nutritive élevée pendant la saison sèche, et que le sud plus humide présente une strate herbacée avec un taux d'azote et de phosphore faible ainsi qu'une valeur nutritive basse pendant la saison sèche.

Cette association entre sec - qualité plus élevée, et humide - qualité plus faible se rencontre également à d'autres endroits et se situe à la base de la différenciation des pâturages dans le sud de l'Afrique : « champs sweet » et « champs sour » (Breman & de Wit, 1983).

Des exceptions se présenteront là où les sols riches jouissent d'une grande disponibilité en eau, tels les sols volcaniques des régions à plus forte pluviosité, notamment en Afrique de l'Est, et les plaines d'inondation. Pour ces dernières régions, il est cependant clair que les précipitations locales ne présentent que peu d'importance pour le potentiel de la production.

En gardant à l'esprit ces observations, il est intéressant de comparer la capacité de charge calculée pour les pays sahéliens avec la biomasse animale présente dans les autres pâturages de l'Afrique. Les données proviennent en majorité de l'Afrique du Sud et de l'Est. Les régions ont été distinguées en fonction d'une fertilité forte ou faible, et les parcs naturels sont considérés par rapport aux régions pastorales (figure I.17).

Figure I.17
Comparaison entre la capacité de charge calculée pour les zones sahélienne et soudanaise sur la base de la disponibilité fourragère pendant une année sèche, et la biomasse animale présente dans les parcs naturels et les régions pastorales en Afrique par rapport à la pluviosité moyenne annuelle, compte tenu de la fertilité du sol.
Les points concernent les parcs naturels, les petites croix concernent les régions pastorales. Les observations en provenance de régions à fertilité de sol relativement élevée sont encerclées. Les flèches relient la situation précédant la période sèche de 1981/1983 avec celle qui a suivi. La courbe représente la capacité de charge calculée pour les zones sahélienne et soudanaise sur la base de la disponibilité en éléments nutritifs pendant une année sèche.

Les données reprises dans cette figure peuvent être résumées comme suit :
- Les régions avec des sols relativement fertiles présentent une biomasse animale par km2 plus élevée que des régions à sols relativement pauvres.

- Dans les régions à sols relativement fertiles, la biomasse végétale augmente fortement avec la pluviosité annuelle.
- Dans les régions avec des sols relativement pauvres, la biomasse animale est le plus souvent très basse en présence de fortes précipitations. Les estimations de Bell (1982) démontrent que sur la base du poids, l'éléphant domine la population d'herbivores dans ces conditions.
- Les évaluations de la capacité de charge du nord et du sud du Sahel correspondent en gros avec les biomasses animales les plus élevées qui ont été mesurées ailleurs pour des pluviosités analogues.
- La biomasse animale présente actuellement dans le nord et le sud du Sahel est comparable pour de grandes parties de la région, à la biomasse animale dans d'autres régions avec des sols relativement pauvres.
- La densité actuelle de la population herbivore dans de grandes régions du Sahel est comparable à la densité de population après des années de sécheresse dans les parcs naturels du sud de l'Afrique (Walter et al., 1987). Dans le Sahel, le bétail a entièrement accaparé l'espace d'une population d'herbivores sauvages qui a existé dans le passé.

Sur la base de cette comparaison, il semblerait que d'une manière générale les conclusions établies pour le nord et le sud du Sahel sont valables. A savoir : dans les régions avec une pluviosité approximative de 500 mm ou moins, l'ampleur de la population herbivore est limitée par la disponibilité en fourrage pendant les années de sécheresse. Des fluctuations de ces populations sont prévisibles, puisque l'offre en fourrage pendant les années normales est de 2 à 3 fois supérieure à celle des années sèches.

Dans les régions à pluviosité supérieure à 500 mm, l'importance de la population herbivore est souvent beaucoup plus faible que ne le laisse supposer la disponibilité en fourrage dans les années sèches. L'explication de ce faible rendement dans la pratique peut s'avérer complexe, mais l'analyse de la productivité des bovins dans les pays sahéliens démontre très clairement un aspect : dans ces conditions (pluviosité plus importante et faible fertilité du sol) les herbivores, qui sont dépendants de la strate herbacée, sont fortement gênés par la faible qualité moyenne de la strate herbacée pendant la saison sèche. Dans cette situation, afin de survivre, les véritables herbiphiles en sont réduits à se contenter d'une faible fraction digestible de la biomasse totale qui conserve à elle seule un taux d'azote nécessaire minimum. Cela signifie que la biomasse animale potentielle ne dépend pas de la production totale de la strate herbacée, mais seulement d'une fraction de celle-ci. Ce manuel tente par ailleurs de quantifier cette fraction pour les pays sahéliens. Une incertitude subsiste cependant sur certaines données de base, et c'est pourquoi il est difficile de faire un calcul exact de la capacité de charge en fonction de la limitation de qualité. Ainsi, plusieurs éléments sont encore incertains : la quantité minimum de fourrage de qualité relativement bonne devant être présente pour permettre une sélection, le rôle du fourrage ligneux dans le menu, dans quelle mesure le fourrage ligneux compense les manques d'azote et de phosphore dans les graminées et herbes, et finalement quel est le degré de gêne éprouvé par les espèces exploitant le fourrage ligneux face aux facteurs négatifs de qualité de ce fourrage (par exemple taux élevés de tanin).

Il est cependant certain que les estimations de capacité de charge sur la seule base de la disponibilité en fourrage, débouchent sur une forte surévaluation des possibilités de production des savanes dans l'Afrique de l'Ouest. Cette situation n'est d'ailleurs pas typique de l'Afrique de l'Ouest. Il semble cependant que le problème de l'Afrique de l'Ouest est accentué à cause d'une répartition saisonnière

extrêmement nette des précipitations. Il en résulte que pour une pluviosité identique, la période de haute qualité du fourrage et donc de croissance du bétail, est relativement brève, alors que la période suivante, sans disponibilité en fourrage de haute qualité et donc avec perte de poids, est relativement longue. L'absence presque totale de pluies pendant la saison sèche, combiné à un faible pourcentage de graminées pérennes dans la savane septentrionale (I.1.4) limite l'importance de la repousse (tableau I.12), tandis que sa qualité n'est pas très élevée (IV).

I.3.5. La productivité des bovins

La production bovine comporte plusieurs éléments: viande, lait, peaux et travail. Le fumier peut être considéré comme un sous-produit, bien que sa production puisse devenir l'objectif principal de l'élevage dans certains systèmes agricoles. Le niveau de production par animal dépend en grande partie de l'alimentation. Ce chapitre est consacré principalement à l'effet qu'exercent les différentes qualités de fourrage sur la productivité bovine dans les pays sahéliens.

De telles divergences résultent principalement des différences de qualité des pâturages naturels dont il a déjà été question à plusieurs reprises, dans la comparaison des pâturages du Sahel avec ceux de la zone soudanaise. Ce sont ces différences zonales qui sont prises comme point de départ, mais dans la pratique, il faudra tenir compte, comme déjà signalé, de la disponibilité en sous-produits agricoles et de la présence de plaines d'inondation. L'objectif final de l'analyse est de déterminer le trajet des valeurs qui entraînera les variations de la productivité bovine dans les pays sahéliens.

L'influence de l'alimentation s'étend à chaque aspect de la productivité bovine : vitesse de croissance, fécondité, production de lait et mortalité. Le rapport le plus direct est celui existant entre l'alimentation et la vitesse de croissance.

La vitesse de croissance est déterminée par la quantité d'énergie que l'animal peut ingérer journellement à partir de la nourriture. Cette quantité est à son tour dépendante de la qualité du fourrage, notamment du taux d'azote et de la digestibilité. A l'aide de ces deux paramètres, l'ingestion de matière digestible (c'est-à-dire l'énergie) peut être estimée, et par conséquent la vitesse de croissance. En présence d'une bonne description de l'offre de fourrage pendant l'année et en faisant une supposition quant à la sélectivité du bétail, il est possible de prévoir l'évolution probable du poids. Ces prévisions ont été faites pour quatre situations, représentée chacune par une image moyenne de la qualité des pâturages dans la zone climatique concernée (tableau I.22 et figure I.18). Dans le tableau et la figure, le nord et le sud de la zone soudanaise ont été réunis compte tenu de leur peu de différences ; une quatrième zone de forte pluviosité, la zone guinéenne, a été ajoutée. Pour la pluviosité moyenne du nord du Sahel, 150 mm a été choisi, tandis qu'ailleurs dans ce livre une valeur de 200 mm est généralement utilisée. Ceci dégage le potentiel élevé du Nord quant à la croissance du bétail (figure I.18). Plus au nord, à une pluviosité en dessous de 150 mm, la qualité fourragère augmentera encore, mais la densité de biomasse deviendra limitative (Breman, 1982). Le tableau I.22 mentionne entre autres l'évolution du taux moyen d'azote de la strate herbacée. Les valeurs sont plus globales que celles du tableau I.20. Dans ce calcul, la contribution des espèces ligneuses n'a pas été prise en ligne de compte.

Figure I.18

Courbes de croissance simulées pour les zébus femelles de 150 kg, basées sur la valeur nutritive de la strate herbacée dans les différentes zones de pluviosité.

—— : < 300 mm ; ----- : 300-600 mm ; - - - - : 600-1200 mm ; ⁻ — — : > 1200 mm.

Tableau I.22

Evaluation de l'évolution du poids vif (kg/mois) par zone climatique d'une velle sevrée, ayant un poids de départ de 150 kg, par rapport au taux d'azote (g/kg) des pâturages et de la disponibilité du fourrage vert.

			j	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	total annuel (kg/an)
saison de croissance moyenne des pâturages (semaines)	pluviosité (mm/an)														
9	0-300	pâturages verts *	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
		taux d'azote :													
		végétation	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	8,0	32,0	25,0	13,0	12,0	11,0	10,0	
		menu	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	8,0	32,0	25,0	13,0	12,0	11,0	10,0	
		évolution mensuelle du poids vif	2	2	2	2	2	0	23	23	14	12	9	7	98
11	300-600	pâturages verts*	-	-	-	-	-	-	+	+	+/-	-	-	-	
		taux d'azote :													
		végétation	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	4,5	27,0	14,0	9,0	7,0	5,5	5,5	
		menu	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	27,0	14,0	10,0	7,0	7,0	7,0	
		évolution mensuelle du poids vif	-4	-4	-4	-4	-4	-4	23	12	6	-4	-4	-4	5
17	600-1200	pâturages verts*	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	

		taux d'azote :													
		végétation	4,0		4,0	4,0	4,0	3,0	24,0	14,0	10,0	8,0	6,0	4,0	4,0	
		menu	7,0		7,0	7,0	7,0	7,0	24,0	14,0	10,0	10,0	7,0	7,0	7,0	
		évolution mensuelle du poids vif	-4		-4	-4	-4	-4	23	12	6	6	-4	-4	-4	15
24	> 1200	pâturages verts*	-		-	-	-	+	+	+	+	+	+/-	-	-	
		taux d'azote :														
		végétation		3,5	3,5	3,5	3,0	24,5	14,0	10,0	8,0	6,0	5,0	3,5	3,5	
		menu	7,0		7,0	7,0	7,0	24,0	14,0	10,0	10,0	10,0	9,0	7,0	7,0	
		évolution mensuelle du poids vif	-4		-4	-4	-4	23	12	6	6	6	2	-4	-4	31

* : strate herbacée verte ; - : strate herbacée desséchée ; +/- : .

La composition du menu des bovins divergera de la composition moyenne de la strate herbacée, à moins que les bovins n'aient pas la possibilité d'effectuer une sélection. Ceci est par exemple le cas lorsque les différences à l'intérieur de la végétation sont faibles. C'est la raison pour laquelle il a été supposé pour le nord du Sahel que le menu est identique à la composition moyenne de la strate herbacée, qu'il s'agisse de la saison sèche ou de la saison humide.

Pour le nord et le sud de la zone soudanaise, cette hypothèse ne peut s'appliquer pour deux raisons :
- la possibilité de pâture sélective est ici plus grande grâce à la structure plus grossière des herbes, et l'utilisation des feux comme outil de gestion ;
- ce n'est qu'en permettant la sélectivité (occupation plus faible des pâturages) que les bovins sont en mesure d'accroître leur poids net annuel.

Les données du tableau I.22 et de la figure I.18 font apparaître une image bien particulière : la productivité la plus importante est prévisible dans le nord sec du Sahel ; vers le sud elle diminue fortement pour augmenter progressivement dans les zones les plus humides. Ceci est le résultat de deux tendances opposées :
- Le gain de poids pendant la saison des pluies est plus grande au fur et à mesure que la saison des pluies dure plus longtemps, c'est-à-dire au fur et à mesure que le nombre de semaines avec du fourrage vert augmente.
- Il n'y a pas de perte de poids pendant la saison sèche dans le nord du Sahel, à cause de la qualité relativement élevée du fourrage à cette époque. Par contre, cette perte de poids est importante dans les zones méridionales compte tenu de la faible qualité de la strate herbacée pendant la saison sèche.

Les calculs du tableau I.22 doivent être utilisés avec la prudence nécessaire. Les valeurs absolues des chiffres sont fonction des suppositions relatives à la sélectivité du bétail pendant la saison sèche. Ceci dépend d'une part de l'occupation des pâturages, mais est finalement déterminé par la capacité physique de l'animal.

Il a été admis ici que, pendant la saison sèche, les bovins peuvent sélectionner un menu avec un taux d'azote moyen de 7 g/kg pour un taux moyen minimum d'azote de la strate herbacée de 3,5 g/kg. Ceci entraîne une perte de poids de 25-35 kg pendant la saison sèche. Si on suppose qu'il est possible d'obtenir dans le menu un taux d'azote de 8 g/kg pour une même composition moyenne de la végétation, la perte de poids ne serait pas inévitable et le gain de poids nette par an augmenterait à l'avenant. Le fait que, pendant la saison sèche, les pertes de poids dans les régions de savane sont très fréquentes, même pour une faible charge de bétail, prouve que la dernière supposition est trop optimiste.

Les données relatives à la vitesse de croissance des bovins sur les pâturages des pays sahéliens sont très rares. Les données existantes confirment néanmoins la tendance décrite ci-dessus, ainsi que les variations absolues dans les modifications annuelles de poids. Ainsi à Ibécéténé, au Niger, dans le nord du Sahel, on a constaté un gain de poids maximum de 47 kg par an pour une pluviosité de 200 mm et une production de la strate herbacée d'environ 700 kg/ha de matière sèche, et ce pour l'occupation de 1 UBT par 13,2 ha (Swift, 1984). A Ekrafane, également dans le nord du Sahel, au Niger, Klein (1981) a constaté un gain de poids maximum de 88 kg/an. Dans ce dernier cas, la croissance des boeufs s'est poursuivie depuis le début de la saison des pluies jusqu'en janvier-février, c'est-à-dire jusque loin dans la période sèche (comme il fallait s'y attendre théoriquement).

Dans les régions à précipitations plus élevées, ce phénomène est inconnu : la croissance s'arrête très brusquement lorsque la croissance de la végétation s'interrompt et la période de perte de poids suit rapidement.

Cette situation a été constatée dans le sud du Sahel, à Niono, lors d'essais de mise en pâturage, les précipitations moyennes étant de 560 mm (Diarra, 1983). Des observations pendant 3 à 4 ans, sur quatres types de végétation différentes ont entraîné des gains de poids de 35 à 70 kg pendant la période des pluies ; la perte de poids intervenant pendant la période sèche consécutive, variait néanmoins entre 60 et 85 kg, ce qui fait que l'année se soldait par une perte et non un gain de poids. L'occupation des pâturages était, il est vrai, plus élevée (environ 1 UBT par 6 ha) que dans les essais cités précédemment, mais la production de la strate herbacée était également plus élevée : plus de 2000 kg/ha. Le mauvais résultat n'est donc pas imputable à un manque d'aliments par tête de bétail, mais doit être attribué à un manque de qualité du fourrage. On peut se demander cependant si une occupation plus faible aurait entraîné un résultat annuel positif : si ce n'est pas le cas, il faut conclure que de tels pâturages ne sont utilisables pour les bovins, qu'en tant que pâturages de saison des pluies ou en complément avec des suppléments de fourrage.

Les données de croissance du bétail dans la zone soudanaise sont encore plus rares. Des mesures effectuées sur un troupeau dans les environs de Sikasso (Mali) ont donné un résultat de 25-30 kg de

croissance par an (Anon., 1983).

Les estimations de la vitesse de croissance des bovins dans les pays sahéliens ont également été comparés avec des données de l'Australie du Nord. Mc Gown et al. (1984) y ont recherché la relation entre la croissance annuelle et les données climatiques. Ils sont arrivés à la conclusion que le gain de poids des bovins sur des pâturages naturels sans apport d'engrais, est directement proportionnel au nombre de semaines de verdure du pâturage. Pour les pays sahéliens cette période correspond en gros à la période de croissance de la végétation : les pluies en dehors de la saison de croissance réelle sont de peu d'importance. La figure I.19 illustre les résultats de cette analyse ainsi que la relation qui a été découverte ici pour les pays sahéliens. Une extrapolation des données australiennes pour le nord de la zone soudanaise et le sud du Sahel confirme les évaluations de la faible productivité dans ces régions ; pour le nord du Sahel, l'extrapolation débouche sur une forte sous-évaluation, puisque cette extrapolation ne tient pas compte de la qualité favorable du fourrage pendant la saison sèche dans la zone la plus aride.

Figure I.19

Relation entre la prise de poids par bovin (élevage sédentaire) et la période pendant laquelle les pâturages naturels des pays sahéliens sont verts (- - - -), comparés à une relation analogue pour l'élevage dans en Australie tropicale (——).

Ce qui a été dit ci-dessus au sujet de la vitesse de croissance des boeufs concerne des animaux sevrés et qui doivent s'alimenter exclusivement avec du fourrage grossier. Pour les veaux, l'effet de l'alimentation sur la vitesse de croissance n'est pas moins grande. Ils sont, en premier lieu, dépendants de la quantité de lait produite par la vache. La quantité de lait déterminante pour la vitesse de croissance est celle qui subsiste après déduction de la partie destinée à la consommation humaine. L'importance de l'effet de la nourriture sur le gain de poids jusqu'à l'âge d'un an, est illustrée par les données de Mesnil (1978). En fonction de l'alimentation, le poids à l'âge d'un an varie entre 60 et 240 kg (figure I.20). Il n'y a pas d'arrêt brusque de la croissance animale simultanément à l'arrêt de la croissance végétale, lorsque la récolte céréalière a eu lieu et que les champs sont accessibles au bétail (Dicko & Sangaré, 1984 ; Leloup & Traoré, 1989). Leloup et Traoré démontrent également le rôle positif que peuvent avoir les tourteaux de coton (quand il y en a) sur l'évolution du poids pendant la saison sèche.

Figure I.20

Evolution du poids pendant la première année des veaux azawak nés au ranch de Ekrafane au Niger, pour différents niveaux d'alimentation:

1 : Bon niveau: lait donné à partir d'un seau, sevrage après 3 mois, puis alimentés avec des suppléments de fourrage basés sur de la poudre de lait et de la farine de froment.
2 et 3 : Niveau raisonnable: les veaux restent auprès de la vache, la totalité de la production de lait est réservée pour le veau, pas de suppléments de fourrage (courbe 2 : veaux nés en janvier et courbe 3 : veaux nés en juillet).
4 et 5 : Niveau médiocre: les veaux restent auprès de la vache, 30-60% de la production du lait destiné à la consommation humaine, 70-40% destiné au veau, pas de suppléments (courbe 4 : veaux nés en janvier; courbe 5 : veaux nés en juillet).
6 : Mauvais niveau: les veaux restent auprès de la vache, seulement 0,66 l de lait disponible par jour pour le veau, pas de suppléments.

Les paramètres comme la fécondité et la production de lait varieront également avec la vitesse de croissance. Ainsi, une mauvaise alimentation entraînera une croissance lente, un début tardif de la vie reproductrice des animaux femelles, une faible production de lait et de longs intervalles de vêlages. A mesure que la situation fourragère s'améliore, tous les paramètres cités connaîtront une évolution favorable. La relation entre ces différents paramètres pour un même niveau d'alimentation est exposée dans III.3.

Les résultats figurent ici sous forme de tableau (tableau I.23).

Ce tableau distingue quatre situations différentes qui correspondent chacune à un certain niveau d'alimentation et de productivité. Ces niveaux ont été choisis de manière à couvrir toute l'échelle des situations de production de l'Afrique de l'Ouest (I.3.6). Outre un certain nombre de paramètres qui varient avec le niveau d'alimentation, le tableau I.23 indique des paramètres qui sont supposés être constants, indépendamment du niveau de l'alimentation. Pour le poids à la naissance et la mortalité, les données étaient insuffisantes pour quantifier l'effet des différences d'alimentation. Le poids à l'âge d'un an a été supposé constant, partant du fait qu'une quantité fixe de lait (500 litres par veau) est destinée à l'élevage des veaux.

Tableau I.23
Paramètres de productivité pour les bovins en fonction de différents niveaux d'alimentation.

	niveau d'alimentation[2)]			
	I	II	III	IV
poids (kg)				
à la naissance (m/f)	20	20	20	20
à l'âge d'un an (m/f)	100	100	100	100
àl'âge de deux ans(m/f)	125	150	175	200
vache adulte	200	250	300	300
âge au premier vêlage (ans)	5,5	3,5	2,5	2,5
taux de fertilité	50	71	86	86
production totale de lait (kg)[1)]	511	810	1114	1361
prélèvement de lait pour la consommation humaine (kg)[1)]	0	300	600	850
mortalité (%)				
< 1 an	20	20	20	20
1-2 ans	5	5	5	5
> 2 ans	2	2	2	2

[1)] par vache par période de lactation ;
[2)] voir I.3.6.

I.3.6. Les systèmes d'élevage

Les système d'élevage dans les pays sahéliens présentent extérieurement une grande diversité. On observe simultanément :
- des systèmes caractérisés par une forte mobilité de l'homme et de l'animal, une grande diversité des espèces animales, une forte différenciation des objectifs de production et un large éventail de travaux couvrant aussi bien diverses activités agraires que non agraires ;
- des systèmes qui présentent des caractéristiques opposées : sédentarité, spécialisation en fonction de l'espèce et du produit et faible association avec d'autres activités ;
- des systèmes qui possèdent un mélange de ces caractéristiques.

Cette diversité pourrait indiquer que l'environnement exerce peu d'influence sur la présence de certaines formes d'élevage. Cependant, le texte précédent a précisément donné l'image d'une grande influence de l'environnement sur la productivité de l'élevage. Comment expliquer ce paradoxe ? Dans les pays sahéliens, les conditions physiques pour l'élevage sont en effet très différentes en fonction de la disponibilité et de la qualité du fourrage, de la disponibilité en eau potable et des maladies et épidémies. Du point de vue zootechnique, les pays sahéliens ne forment absolument pas un milieu homogène. Aussi, la présence, la viabilité et la productivité de certaines formes d'élevage, sont étroitement liées à ces différences régionales ou locales. L'élevage laitier en constitue un bon exemple. Jusqu'à récemment, l'élevage laitier était caractéristique des systèmes pastoraux du nord du Sahel. De tout temps les bovins vivaient dans la savane, mais l'élevage laitier n'a pu s'y développer à cause d'une productivité trop faible : la production laitière par vache était insuffisante pour permettre une existence d'éleveur laitier. Cette situation changea, bien que de façon limitée, avec l'apparition de sous-produits agro-industriels tels les tourteaux de coton. Ils sont à la base des entreprises de production laitière autour des grandes villes dans la zone de savane.

Les différences régionales ou locales dans la qualité des pâturages et d'une manière générale, dans la qualité de l'alimentation, ont donc bien un caractère décisif pour les perspectives de certaines activités d'élevage. C'est sur ces effets que portera principalement l'analyse.

Les différences dans la qualité de la nourriture peuvent être classifiées selon une échelle distinguant un certain nombre de niveaux. Le niveau le plus bas décrit une situation où les boeufs ne sont pas en mesure d'augmenter leur poids net en une année de temps : aucun élevage bovin n'est possible. Les types de pâturages qui donnent lieu à une telle situation sont impropres à l'élevage sédentaire sans l'utilisation de suppléments de fourrage.

Au niveau suivant, les animaux sont en mesure de prendre du poids en une année, mais le niveau de l'alimentation est tellement bas qu'une reproduction fructueuse de la population est impossible.

Le niveau qui suit garantit la continuité de la population et les perspectives d'élevage commencent à devenir attrayantes du point de vue de la production de viande et de fumier : la production de lait est encore tellement basse qu'elle doit être entièrement réservée au veau. Cette situation correspond au niveau I du tableau I.23 et représente le niveau le plus bas sur lequel peut fonctionner une population de boeufs ; compte tenu du début tardif de la vie reproductrice des génisses et du faible taux de naissances, la population est juste en mesure de se maintenir. Toutes les génisses qui ont atteint l'âge de reproduction sont nécessaire pour remplacer les vaches adultes qui meurent ou qui sont soustraites au troupeau à l'âge de onze ans ; une extension par une reproduction naturelle n'est donc pas possible.

Le niveau II dans le tableau I.23 représente une situation avec des conditions d'alimentation un peu meilleures. Ces conditions sont telles que plus d'un tiers de la production totale de lait est disponible pour la consommation humaine sans mettre gravement en danger les chances de survie des veaux.

Les niveaux III et IV représentent une nouvelle amélioration des paramètres de la productivité sous l'influence de meilleures conditions d'alimentation.

Les systèmes d'élevage bovin sont situés quelque part sur cette échelle de productivité. Dans la situation actuelle, dans la zone soudanaise, de nombreux systèmes d'élevage sédentaires, se situent entre le niveau I et II. Pour les systèmes du nord du Sahel, la situation est en principe plus favorable : ils se situent autour du niveau II avec au maximum des pointes vers le niveau III, à moins qu'une trop grande densité ne s'y oppose.

Les systèmes d'élevage qui utilisent alternativement les pâturages exondés du nord ou du sud du Sahel dans la saison des pluies, et le delta du Niger ou plaines d'inondation analogues pendant la saison sèche, doivent pouvoir atteindre au moins le niveau II et même le niveau III, à moins que là également le surpâturage supprime l'avantage potentiel des bons pâturages de saison sèche.

Le niveau IV est exclusivement atteint dans les stations expérimentales, ou accidentellement dans les entreprises laitières, grâce à l'utilisation de grandes quantités de sous-produits agricoles.

On peut voir que la position des systèmes sur l'échelle de la productivité n'est pas immuable ; un système peut devenir plus productif grâce à une intervention au niveau de l'alimentation ; la productivité d'un système peut également diminuer sous l'influence d'une détérioration des conditions. Malheureusement, dans la pratique, les deux cas se présentent. L'utilisation de compléments de fourrage exerce localement un effet positif sur la position de l'élevage bovin, mais le surpâturage et la dégradation des pâturages exercent sans doute à plus grande échelle un effet négatif sur l'évolution de la productivité.

La position des systèmes d'élevage bovins dans les pays sahéliens est-elle robuste ou instable ? Quelle est la dépendance de la productivité et donc sa viabilité face aux modifications dans les conditions d'alimentation ? Afin de donner une réponse à cette question il faut considérer la productivité du système tout entier. Il ne suffit pas de considérer les modifications survenant dans les paramètres individuels, tels que vitesse de croissance d'animaux d'une certaine catégorie d'âge ou la production de lait de vaches

adultes. Ce qu'il faut, c'est une unité de mesure pour la productivité moyenne, la production moyenne par tête de bétail. L'unité la plus courante dans l'élevage extensif, que ce soit d'un point de vue biologique ou économique, étant donné la population (le troupeau), des calculs ont été faits sur la productivité du troupeau. Ces calculs ont porté sur les quatre niveaux d'alimentation décrits précédemment (tableau I.23), à partir des éléments suivants :
- L'importance de la population est considérée comme étant constante ; un accroissement potentiel est ajouté à la production.
- La disparition des animaux provient de la mortalité et de la vente. Les vaches adultes qui atteignent leur onzième année sont vendues. L'âge de vente des génisses qui ne sont pas nécessaires au remplacement des vaches adultes, est considéré comme une donnée variable. Il en va de même pour l'âge de vente des animaux mâles. Il en découle l'impression que la gestion et la structure du troupeau influencent la productivité.
- La production se compose des animaux vendus et de la quantité de lait qui subsiste après déduction de 500 litres par veau.

Les résultats de ces calculs sont repris dans le tableau I.24. Pour les niveaux d'alimentation II, III et IV, on distingue deux alternatives. L'alternative « a » concerne un système qui maximalise la production de viande par animal ; l'alternative « b »concerne un système qui maximalise la production de lait par animal. Le dernier cas est donc représentatif d'une entreprise laitière où les veaux excédentaires sont gardés jusqu'à l'âge de 1 an, puis vendus. Le premier système correspond plus aux formes les plus courantes de l'élevage extensif dans les pays sahéliens, bien que la structure du troupeau supposée dans ce cas, indique dans la pratique une vente un peu plus rapide des animaux mâles. Mais dans la pratique, les différences dans la structure du troupeau existent également et relèvent en partie des différents objectifs de production.

Le tableau I.24 donne tout d'abord une idée de la qualité moyenne du fourrage nécessaire pour réaliser le niveau de production en question. Les données concernent les combinaisons de taux d'azote et de digestibilité telles qu'elles existent dans les pâturages naturels non fertilisés des pays sahéliens. Il en va de même pour la dérivée, l'ingestion de nourriture comme pourcentage du poids moyen. Le résultat est que l'ingestion d'énergie classifiée selon le poids métabolique, ne diverge pas beaucoup entre les niveaux I et IV : si dans le premier cas, l'ingestion d'énergie est fixée à 100 %, au niveau IV les animaux consomment seulement 23 % de plus.

Néanmoins, les différences dans la production par tête, en fonction des niveaux successifs d'alimentation sont très grandes : la productivité au niveau II est 3 à 4 fois plus élevée que celle du niveau I, le niveau III est presque deux fois plus productif que le niveau II, et le niveau III comparé au niveau I donne une différence de facteur 8.

Tableau I.24
Productivité de l'élevage des bovins dans les pays sahéliens, en fonction de différents niveaux d'alimentation (I-IV), dans le cas d'une gestion du troupeau pour la production de viande (a) ou de lait (b).

	I	II		III		IV	
		a	b	a	b	a	b
composition du fourrage :							
taux d'azote (g/kg)	9	10		11		12	
digestibilité (%)	52	54		56		59	
absorption de fourrage :							
% du poids	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,2	2,4
prise relative d'énergie (%)	100	108		115		123	
poids moyen par animal (kg)	150	173	162	183	173	196	177
structure du troupeau :							
% d'animaux mâles	33	43	18	44	22	44	22
% d'animaux femelles	67	57	82	56	78	56	78
âge lors de la vente :							
animaux mâles (an)	5	5	1	4	1	4	1
animaux femelles (an)	5	3	1	2	1	2	1
pourcentage d'exclusion sur le total	11	15	27	19	33	19	33
répartition à la vente :							
% d'animaux mâles	54	51	53	51	52	51	52
% de génisses	0	26	26	33	33	33	33
% de vaches de 11 ans	46	23	21	16	15	16	15
production (kg/animal) [1] *:*							
poids vif	22	39	35	52	43	59	43
lait [2]	-	64	107	160	260	229	368
viandes protéines	1,9	3,3	3,0	4,4	3,7	5,0	3,7
lait protéines [2]	-	2,3	3,9	5,8	9,3	8,2	13,2
total protéines	1,9	5,6	6,9	10,2	13,0	13,2	16,9
production (MJ/animal) [1] :							
viande-énergie	142	272	178	367	214	426	214
lait-énergie	-	223	374	565	909	800	1288
total énergie	142	495	552	932	1123	1226	1504
efficacité de la production (%) :							
transformation de l'énergie-fourrage							
en énergie lait et viande	0,7	2,0	2,3	3,5	4,2	4,2	5,5

production énergie-lait et -viande en tant que fonction de la quantité totale d'énergie dans la biomasse animale	8	23	27	39	49	47	64

1) moyenne par tête, sans distinction de l'âge et du sexe ;
2) fraction prélévée pour la consommation humaine.

La conclusion est claire : de petites différences dans la qualité du fourrage offert entraînent des différences relativement faibles dans l'ingestion d'énergie, mais débouchent finalement sur des différences très importantes dans la productivité. Ceci est inhérent à une situation où la production se situe près du niveau zéro. Dans une telle situation, pratiquement toute l'énergie ingérée est utilisée pour la survie de l'individu et de la population.

Ceci apparaît clairement dans les efficacités de production qui figurent dans le tableau I.24. Au niveau le plus bas, seul 0,7 % de l'énergie brute contenue dans les aliments ingérés est « récolté » par l'homme sous forme de viande et de lait. Au niveau II, ce pourcentage est triplé, mais reste encore très bas d'un point vue absolu.

La productivité de l'élevage est donc très sensible aux modifications dans la qualité et/ou disponibilité du fourrage. Cela signifie également que les résultats des efforts fournis pour obtenir une meilleure alimentation, seront très positifs. A cet égard, il n'est pas étonnant de constater le mal que se donnent les éleveurs pour trouver des pâturages meilleurs. Le motif qui se cache derrière le nomadisme et la transhumance est en premier lieu la recherche de meilleurs fourrages. Ainsi, la gestion des troupeaux est tout d'abord l'art de diriger le bétail vers les meilleurs pâturages.

La politique de vente est un instrument beaucoup moins efficace pour augmenter la production par tête de bétail ; ceci ressort d'ailleurs de la comparaison entre les alternatives « a » et « b » du tableau I.24. Mettre l'accent sur la production de lait entraîne du point de vue biologique une forme productive plus efficace, mais dans la pratique, les possibilités sont limitées par des problèmes de conservation, de transport et de débouchés.

Productivité de l'élevage des bovins dans les pays sahéliens, en fonction de différents niveaux d'alimentation (I-IV), dans le cas d'une gestion du troupeau pour la production de viande (a) ou de lait (b).

La mobilité, avec comme conséquence l'utilisation sélective d'une offre variable dans l'espace et le temps, de produits en provenance de divers pâturages, est l'un des moyens par lesquels les éleveurs tentent de stabiliser le niveau de production de saison en saison et d'année en année. Un autre moyen important est sans aucun doute d'entretenir plus d'animaux que nécessaire pendant les années favorables ou moyennes. Les variations de productivité qui ressortent du tableau I.24, appellent à la prudence pour l'estimation de la quantité de bétail nécessaire à la survie d'une famille : un nombre permettant d'obtenir

un surplus de lait pendant une année normale, peut s'avérer beaucoup trop bas pendant une année défavorable par suite de la combinaison du faible nombre de vaches en gestation et d'une faible production de lait.

La mobilité et l'effectif du troupeau sont des moyens efficaces de stabilisation de la production tant qu'il y a suffisamment de place pour chacun. A mesure que l'espace disponible diminue, on approche du seuil critique où la productivité de l'élevage bovin diminue fortement. Une baisse rapide de la disponibilité en lait en constitue un premier signal. Une intervention efficace permettant de sortir de cette spirale, exige de toute façon une amélioration de l'alimentation. Si ceci est hors de portée de l'éleveur individuel, il ne lui restera que la recherche de revenus accessoires en provenance d'autres activités agricoles ou non-agricoles.

Partie II.1 et II.2
Partie II.3
Partie II.4 et II.5
Partie III
Partie IV, bibliograpie et annexes

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens (Partie II.1 et II.2)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

Table des matières
Partie I

II. Evaluation de la production des pâturages

II.1. Introduction

Les zones arides et semi-arides de l'Afrique occidentale sont caractérisées par une forte variabilité des précipitations et de leur répartition, selon les années et le lieu géographique. Cette variabilité entraîne dans ces régions, d'importantes fluctuations de la composition botanique et de la production végétale des pâturages. De plus, le mode et la pression d'exploitation peuvent exercer une influence profonde sur ces caractéristiques. Toute méthode d'évaluation devra tenir compte de cette variabilité (I.1).

Cette partie traite plus en détail de la méthode d'évaluation adoptée dans la partie I. Cette méthode présuppose qu'en première instance les caractéristiques du paysage et le climat déterminent le niveau et la qualité de la production végétale (II.2, II.3 et II.4). La description quantitative des caractéristiques du paysage (type de sol et relief) et du climat (longueur du jour, pluviosité et évapotranspiration) d'une région, forment la base de l'évaluation théorique de la composition botanique et des possibilités de la production végétale. Ces évaluations seront ensuite comparées aux données obtenues sur le terrain, afin de vérifier les évaluations et de les préciser si nécessaire.

Les différents éléments de la méthode d'évaluation sont illustrés à l'aide d'exemples. Les auteurs de ce manuel ont acquis une grande partie de leur expérience au Mali ; ils disposent donc d'un nombre relativement important de données concernant ce pays, et c'est pourquoi la plupart des exemples se réfèrent au Mali (carte II.1). Dans la mesure du possible et pour autant que ce soit justifié, des extrapolations ont été pratiquées pour d'autres situations et d'autres régions. Bien qu'il soit toujours préférable d'utiliser des expériences et des données propres, l'utilisateur pourra se référer aux présentes évaluations pour pallier à l'absence éventuelle de données.

Carte II.1
Localisation géographique au Mali des zones concernées par les trois exemples.
A : Evaluation globale (II.2) ;

B : Evaluation semi-détaillée : le trajet nord-sud (II.3) ;
C : Evaluation détaillée : le ranch près de Niono (II.4).

Trois exemples ont été choisis pour procéder à l'évaluation ; ils diffèrent par l'étendue de la région à évaluer, par l'échelle et par le degré de détail. Le choix de l'étendue de la région, de l'échelle et du degré de détail des exemples traités, est arbitraire : les exemples servent uniquement à permettre l'analyse d'un maximum de situations. Pour chaque évaluation de pâturage, il faudra effectuer un choix quant à l'échelle, le degré de détail et la précision de l'évaluation. Les critères entrant en ligne de compte sont : l'objectif recherché et les moyens disponibles du point de vue temps, argent et main-d'oeuvre.

Pour chaque exemple, l'accent porte sur un élément précis de l'évaluation. Une région étendue a servi d'exemple pour la description du processus théorique d'évaluation de la production primaire sur la base des caractéristiques de paysage et de climat. Le choix a porté sur une petite échelle (1 : 500.000). L'évaluation est globale et exclusivement basée sur des données en provenance d'écrits (II.2).

Le second exemple illustre une évaluation plus détaillée de la production végétale potentielle. L'échelle adoptée est plus grande (1 : 100.000) et, dans ce cas, photos aériennes et d'images satellites récentes ont été utilisées. L'accent porte cependant sur le traitement des données, qui doivent être récoltées sur le terrain au cours d'une seule saison de croissance. Il s'agira également d'expliquer l'objectif de la collecte et l'interprétation des données, permettant de vérifier et de préciser davantage les estimations théoriques. Une explication sera fournie ensuite sur la manière d'extrapoler ces données pour des années de pluviosité différente ou pour des situations où la pression et le mode d'exploitation diffèrent. Afin de rencontrer dans la zone à évaluer un maximum de variations des caractéristiques de paysage, de climat et d'utilisations des terres, l'exemple sélectionné représente une bande étroite du nord vers le sud (II.3).

Le dernier exemple est celui d'une évaluation détaillée d'une région peu étendue (échelle 1 : 50.000). Cette évaluation détaillée est caractérisée par la disponibilité en données obtenues sur le terrain, données couvrant quelques années consécutives. Ainsi, il est possible d'illustrer le mode d'interprétation des données variant d'année en année. Cet exemple est accompagné de suggestions pour la recherche expérimentale (II.4).

L'évaluation de la production végétale ne constitue pas un objectif en soi, mais constitue une aide pour répondre aux questions du genre :
- quels facteurs déterminent la production végétale et animale ?
- quelle est l'évolution de l'état des pâturages ?
- quelle est la production animale possible compte tenu de la situation actuelle du fourrage et du système de production ?
- si cette production n'est pas réalisée, quelle en est la cause ?
- quelle est la production animale escomptée dans le cas de modification du système de production ?
- quelle peut être la production animale dans le cas de modification de l'offre fourragère par amélioration quantitative ou qualitative de la production végétale, et comment réaliser une telle amélioration ?

II.5 traite de la manière d'évaluer la production animale compte tenu de l'offre fourragère résultant des différents systèmes de production.

II.2. Evaluation globale

II.2.1. Introduction

Une méthode d'évaluation de la production végétale et de la situation fourragère d'une région, à l'aide d'une quantité limitée d'informations et sans travail sur le terrain est présentée ici. L'accent est mis sur l'explication de la méthode de calcul utilisée. Le choix a porté sur une région de 78.480 km2 à la frontière entre la Mauritanie et le Mali (carte II.1). Cette évaluation globale a été voulue la plus simple possible, afin de donner à la méthode de calcul un maximum de clarté. Cependant, de nombreux renvois vers d'autres chapitres interviendront, pour permettre de trouver les informations nécessaires à l'extension de certaines parties de l'évaluation.

La marche à suivre est identique à celle qui a été suivie pour l'estimation de la production végétale et de l'offre fourragère des pâturages des pays sahéliens dans leur ensemble. Il est ainsi possible de procéder à une vérification des chiffres présentés dans la partie I, concernant le niveau et la qualité de la production végétale (I.2.4 et I.2.5) et de l'offre fourragère (I.3.3).

II.2.2. Estimation de la production végétale

II.2.2.1. Classification en unités de paysage

La première étape pour l'évaluation de la production végétale d'une région consiste à la découper en unités de paysage. Les critères de cette classification sont les caractéristiques de paysage déterminantes pour la relation entre la pluviosité et l'eau disponible pour la croissance végétale. Bien que la disponibilité en éléments nutritifs soit le facteur de production déterminant, surtout lorsque la quantité d'eau infiltrée dépasse 250 mm, le bilan hydrique occupe une place centrale dans la méthode d'évaluation globale. En effet, on suppose que le bilan d'azote détermine la disponibilité en N pour la végétation et donc la production (I.2.2.3), tandis qu'à son tour ce bilan est défini par le bilan hydrique. Le bilan en azote est par ailleurs déterminé par la fertilité naturelle du sol et influencé par le mode et la pression d'exploitation. La production estimée théoriquement, son taux d'azote et la quantité d'azote dans la biomasse aérienne (*N*b) ne peuvent être vérifiés que lorsque des données peuvent être recueillies sur le terrain, et il est alors possible de dépister des différences dans la fertilité du sol (II.3).

Les caractéristiques du paysage, le relief et la texture du sol, ont leur importance pour le degré de répartition de l'eau de pluie par ruissellement. Les informations relatives au relief peuvent être obtenues à partir de cartes topographiques, comme en publié par l'Institut Géographique National (IGN). Ces cartes contiennent également des informations globales quant à la texture du sol ; la « carte des sols du monde » (FAO-Unesco, 1977) constitue parallèlement une aide efficace.

La présence de cours d'eau, de zones d'accumulation des écoulements (mares ou plaines d'inondation) et de concentration de routes et de villages, constituent des indications pour la redistribution en surface de l'eau de pluie par ruissellement, tout comme les motifs de végétation reconnaissables sur les images satellites et photos aériennes.

La région choisie (carte II.1) a été répartie en unités de paysage, à l'aide des informations suivantes :
- cartes topographiques de l'IGN ; échelle 1 : 500.000 ; no. ND-29-NO et ND-30-NO respectivement des années 1961 et 1959 ;
- images satellites de LANDSAT ; 1972 et 1975.

Les informations en provenance des cartes topographiques utilisées pour constituer la carte des unités de paysage, sont regroupées dans la carte II.2.

Carte II.2
Résumé des informations fournies par les cartes topographiques concernant la répartition en unités de paysage.

Dans un premier temps, la région est subdivisée en unités géomorphologiques à partir de la carte topographique, c'est là une des étapes de l'évaluation détaillée permettant de dépister d'éventuelles différences dans la fertilité du sol. I.2.2.1 présente déjà une description des unités principales : l'ensemble détritique, l'ensemble sablonneux et l'ensemble fluviatile ou lacustre.

L'ensemble détritique (ED) est caractérisé par sa position relativement élevée dans le paysage, par la présence de formations rocheuses (grès ou carapace latéritique), par des pentes à forte inclinaison (escarpements) et, notamment dans le Sahel proprement dit, également par la présence de brousse tigrée.

L'ensemble sablonneux éolien (ES) est caractérisé par la présence de formations de dunes parallèles orientées dans le sens nord-est/sud-ouest. Les autres formations sablonneuses de l'ensemble sablonneux ne peuvent être reconnues en tant que telles sur les cartes topographiques, mais un nombre relativement faible de cours d'eau (semi-)permanents et une végétation relativement homogène (informations obtenues à l'aide d'images satellites) indiquent une texture sablonneuse du sol. Du point de vue de l'altitude, l'ensemble sablonneux se situe généralement entre l'ensemble détritique et l'ensemble fluviatile ou lacustre.

Les parties les plus basses du paysage appartiennent donc à l'ensemble fluviatile ou lacustre (EF). Les cartes topographiques les signalent en tant que plaine d'inondation, comme c'est le cas dans l'exemple pour le delta actuel du Niger, ou en tant que « sables humides » (une dénomination qui prête à confusion car il s'agit principalement de sols lourds). Les dépôts plus anciens résultant des anciennes plaines d'inondation comme dans l'exemple du delta fossile du Niger, sont reconnaissables à la forte concentration de cours d'eau (semi-)permanents.

Dans l'exemple choisi, l'ensemble détritique se situe au sud-ouest et au centre nord de la région ; l'ensemble fluviatile ou lacustre se situe principalement à l'est (delta actuel et fossile de la rivière du Niger) et une partie plus petite se situe dans le nord-ouest. A l'échelle utilisée, le restant de la région est classé dans l'ensemble sablonneux, même si cela implique probablement une erreur de classification de parties de l'ensemble fluviatile ou lacustre. Au niveau de l'évaluation globale, les sols sablonneux sont de toute façon traités de façon identique. Il est d'ailleurs difficile de déterminer à cette échelle, si le sable a été déposé à l'intérieur de l'ensemble fluviatile ou lacustre par l'intermédiaire de l'eau, ou bien, si les dépôts fluviatiles ont été recouverts ultérieurement. Par contre, les sols sablonneux dans ou à proximité de cette unité de paysage, sont facilement reconnaissables grâce à la présence de nombreux villages et routes ; ces sols peuvent en effet convenir relativement bien à l'agriculture.

Les unités géomorphologiques peuvent à présent être repartagées en unités de paysage, le critère utilisé étant la capacité d'infiltration du sol en fonction de la texture et du relief.

A l'intérieur de l'ensemble détritique, une différenciation pourrait être effectuée entre les plateaux, les versants et les zones à accumulation des écoulements, à condition de connaître les superficies de ces sous-unités. Cependant, à l'échelle des cartes utilisées, ces superficies ne peuvent être observées. C'est pourquoi dans l'exemple, l'ensemble détritique est considéré comme une seule unité de paysage (ED) à l'intérieur de laquelle la faible capacité d'infiltration des sols sablo-limoneux et des sols limoneux, ainsi que le relief prononcé, entraînent un ruissellement fréquent en surface, ce qui débouche sur une perte en eau de pluie dans cette unité de paysage.

L'ensemble sablonneux peut encore être repartagé en sols sablonneux à texture plus grossière et à texture plus fine. Les dunes prononcées, parallèlement orientées (S_d), présentent en général une texture plus grossière à grande capacité d'infiltration, résultant en une infiltration pratiquement homogène. Les sols sablonneux restants sont plus plats et présentent une texture plus fine ; il s'y produit une redistribution locale de l'eau par suite du ruissellement en surface (S_a). L'unité S_a englobe aussi quelques zones sablonneuses appartenant vraisemblablement à l'ensemble fluviatile. La recherche du projet PPS n'a pu établir des différences de disponibilité en eau et en éléments nutritifs entre les sols sablonneux des deux ensembles. Mais lorsque l'origine des sols est connue, il faut être conséquent et cartographier séparément les sols sablonneux des deux ensembles.

L'ensemble fluviatile ou lacustre est à nouveau réparti en zones à ruissellement et en zones à concentration des écoulements. Les zones à concentration des écoulements se présentent sous forme de plaines d'inondation (F_{in} + F_{ir}) et de plaines plus importantes à basse altitude qui ne sont pas inondées à partir du Niger (F_{sh}), mais qui recueillent l'eau de ruissellement de l'ensemble détritique. Le nom est celui utilisé sur les cartes topographiques. Du point de vue pédologique cette appellation est incorrecte : il s'agit de sols lourds. Lorsque les zones d'irrigation sont suffisamment importantes, elles peuvent être considérées séparément (F_{ir}), comme cela a été fait dans le cas de l'exemple pour les zones irriguées de l'Office du Niger. Les zones basses à ruissellement sont reconnaissable grâce à la « structure » de

drainage ($F_{éc}$). Ces plaines argileuses et limoneuses, dépôts d'anciennes plaines d'inondation et de fleuves, sont recouvertes d'une couche de sable d'épaisseur variable, qui a donné lieu à des différences d'altitude. La texture est sablo-limoneuse, limoneuse ou argileuse, la capacité d'infiltration est limitée, ce qui entraîne un ruissellement en surface.

La carte II.3 présente le résultat de la subdivision en unités de paysage de la région prise en exemple. Une classification plus précise et plus détaillée sera possible, dès qu'images satellites et photos aériennes récentes pourront être utilisées, et à condition de disposer simultanément d'une connaissance approfondie du terrain (II.3).

Carte II.3
Les différentes unités de paysage selon les informations de la carte II.2

II.2.2.2. Evaluation de la quantité d'eau infiltrée (I)

Une unité de paysage peut se composer de zones où l'infiltration est totale, de zones où l'eau ruisselle partiellement, et de zones où l'eau de ruissellement se rassemble. Une partie de l'eau de ruissellement peut quitter l'unité, soit par la surface, soit par les cours d'eau.

Pour les zones où l'infiltration d'eau est totale, la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) correspond à la pluviosité annuelle (P).

La quantité d'eau qui s'infiltre aux endroits où l'eau ruisselle, est une fonction de la pluviosité, corrigée par la quantité d'eau qui ruisselle en surface ; elle peut être mise en équation :

$$I = P \times (1 - R) \qquad \text{(équation II.1)}$$

dans laquelle :
I = la quantité moyenne d'eau infiltrée (mm/an) ;
P = la pluviosité moyenne (mm/an) ;
R = la fraction moyenne de P qui ruisselle en surface, soit le coefficient de ruissellement.

La part des précipitations qui ruisselle est fonction de l'intensité et de la durée des pluies, des caractéristiques du sol - à savoir la texture et la rugosité de la surface - et du degré de recouvrement du sol par la végétation et les restes de végétation. Le coefficient de ruissellement (R) peut donc varier fortement au cours d'une même saison de pluies, en fonction de chaque pluie et de la localisation. Compte tenu du caractère global de l'évaluation, il est impossible de considérer ce niveau de détail. C'est pourquoi des coefficients annuels moyens de ruissellement ont été définis par type de sol, pour différentes quantités moyennes de précipitations annuelles (tableau II.1). La méthode d'obtention de ces valeurs moyennes est expliquée dans III.2.4.

Tableau II.1
Coefficients moyens annuels de ruissellement pour les unités de paysage figurant dans la carte II.3, en fonction de différentes quantités de pluie.

	unité de paysage *					
	Sahel	Dé savane	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
pluviosité (mm/an)						
≤ 200	0,15	-	0,05	0,15	0,45	-0,25
200-400	0,40	-	0,10	0,20	0,50	-0,25
> 400	0,40	0,50	0,10	0,20	0,50	-0,25

* concordance globale avec la répartition des paysages de Boudet (1978) : Dé = complexe de Sq, Pl et La, mais dominé par Sq ; S_d = Os ; S_a = Ps ; $F_{éc}$ = Pl ; F_{sh} = La.

La quantité d'eau dans les parties basses d'une unité de paysage est potentiellement égale aux précipitations augmentées de l'eau qui ruisselle à partir de zones à infiltration insuffisante de cette même unité ; elle est par conséquent dépendante du rapport qui existe entre les surfaces de zones à ruissellement et de zones à concentration des écoulements d'une part, et le coefficient de ruissellement de zones à ruissellement. Pour les zones à concentration des écoulements, l'infiltration *I* peut être décrite à l'aide de l'équation II.1, mais le coefficient de ruissellement doit alors avoir une valeur négative. L'infiltration peut être calculée à partir du rapport de surface précité et le R des zones à ruissellement.

Dans les cas où le ruissellement en surface et/ou les cours d'eau entraînent l'évacuation d'eau hors de l'unité, il faudra encore déduire cette quantité de la quantité qui peut potentiellement s'infiltrer dans les parties basses de l'unité. Les pertes de l'unité sont approximativement égales au débit des cours d'eau, mesuré aux endroits où ils quittent l'unité (facteur K_r ; III.2.4). II.3 explique plus en détail comment à l'aide du rapport entre les superficies des zones à concentration des écoulements et celles à ruissellement et le facteur K_r, il est possible de calculer le bilan hydrique pour les zones à concentration des écoulements.

Compte tenu du caractère global de l'évaluation et la disponibilité réduite d'informations, l'approche utilisée est identique à celle de I.2.4.

L'unité de paysage ED est constituée d'un complexe de plateaux, de versants et de vallées. Les plateaux et les versants se composent principalement de sols peu profonds à texture sablo-limoneuse à limoneuse

à coefficient de ruissellement de 0,45-0,50. Les pertes d'eau au profit des vallées ou d'unités voisines, sont donc importantes. En outre, on assiste à une redistribution locale à l'intérieur des sous-unités plateau et versant, ce qui est par exemple également à l'origine de la brousse tigrée. Aux endroits où les versants deviennent vallées, les sols sont plus profonds et présentent une texture argileuse. Les vallées à sols lourds, ne représentent qu'une partie relativement petite de la surface de ED. Pour l'ensemble de ED, il n'est donc pas trop erroné de calculer la quantité moyenne d'eau infiltrée sur la base du coefficient de ruissellement des plateaux et des versants. Il en résultera une certaine sous-estimation de la production végétale, car dans les vallées, l'eau infiltrée n'est pas inférieure mais au contraire supérieure à la pluviosité annuelle. Ce phénomène n'entraînera cependant pas une augmentation suffisante de la production végétale pour compenser l'influence de l'accumulation des écoulements :
- les pertes d'eau dans les vallées sont importantes ; elles sont dues au drainage en dehors de la portée des racines, à l'évaporation supplémentaire des flaques et lacs constitués sur les sols lourds des vallées, et aux écoulements vers l'extérieur ;
- la production n'augmente pas proportionnellement à la disponibilité en eau, car la disponibilité en éléments nutritifs est très réduite.

Le même raisonnement a été suivi pour les unité de paysage S_d, S_a et $F_{éc}$: la quantité moyenne d'eau infiltrée est calculée exclusivement sur la base des coefficients de ruissellement de zones où l'eau ruisselle. L'unité de paysage S_d est constituée principalement de dunes parallèles de sable grossier à bas coefficient de ruissellement (0,05-0,10). Les dunes de l'unité de paysage S_a sont constituées de sable plus fin avec un coefficient de ruissellement de 0,15-0,20. L'unité de paysage Féc est constituée de sols sablo-limoneux, de sols limoneux et de sols argileux à coefficient de ruissellement 0,45-0,50.

L'eau qui ruisselle en surface des unités avoisinantes se rassemble dans l'unité F_{sh}. La quantité d'eau qui entre dans l'unité dépend de la superficie et du coefficient de ruissellement de la zone de provenance de l'eau. Dans le cadre de la présente évaluation globale, ces superficies n'ont pas été déterminées. C'est pourquoi de manière quelque peu arbitraire, on a supposé que la quantité d'eau infiltrée dans cette unité est de 25 % supérieure aux précipitations (R = -0,25).

Le tableau II.1, réunit les coefficients de ruissellement des unités pour différentes quantités annuelles de pluie. Y est décrite également la correspondance globale des unités de paysage à la classification des paysages de Boudet (1978), utilisée dans la partie I.

Les unités de paysage Fin et Fir ne sont provisoirement pas prises en ligne de compte, car la quantité d'eau infiltrée dans ces unités, mis à part celle des précipitations locales, est surtout dépendante de l'apport d'eau des rivières, qui à son tour est dépendante de la pluviosité en d'autres endroits (II.2.3.1).

Le calcul de la quantité d'eau infiltrée nécessite en plus de la connaissance des coefficients de ruissellement, celle de la pluviométrie. Ceux-ci sont normalement disponibles en grand nombre et bien documentés ; on peut les trouver dans différents documents comme par exemple Davey (1958), Cochemé & Franquin (1967) et (FAO, 1984). Les données de pluviométrie les plus récentes peuvent être

obtenues auprès des services météorologiques nationaux ou auprès du centre international AGRHYMET à Niamey. L'utilisateur peut consulter la carte I.3 ou d'autres cartes analogues, s'il ne peut avoir recours à aucune des sources mentionnées.

Les isohyètes de la carte II.3 ont été obtenues à partir des données pluviométriques du CIEH (1965) et de la FAO (1984). Elles représentent la pluviosité moyenne annuelle, la pluviosité d'une année dite normale, c'est-à-dire la pluviosité qui sera dépassée pendant la moitié du nombre d'années (probabilité de 50 pour cent = p50%). Compte tenu des fortes fluctuations des pluies d'une année sur l'autre et par conséquent des fluctuations de la production végétale, il est souhaitable de tenir compte des années sèches. Le critère retenu est celui d'une pluviosité faible, qui sera dépassée 9 fois sur 10 ans (probabilité de 10 pour cent = p10%). La production végétale est alors estimée pour les années moyennes et les années sèches, de manière à citer deux valeurs par zone de pluviosité, pour chaque unité de paysage.

La figure II.1 compare la pluviosité pendant les années sèches à la pluviosité moyenne, ce qui permet de retrouver la pluviosité pendant les années sèches sur une isohyète déterminée. Cette figure est basée sur une analyse de la pluviométrie, observée sur de nombreuses années auprès de quelques stations météorologiques du Mali. Elle peut bien entendu être vérifiée et adaptée, à condition de disposer de listes de chiffres rassemblés depuis de nombreuses années dans la région que l'on désire évaluer.

Figure II.1
Pluviosité pendant les années sèches (p10%) par rapport à la pluviosité pendant les années moyennes (p50%).
Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 47 .

A l'aide de l'équation II.1 et des coefficients de ruissellement (tableau II.1), la quantité d'eau infiltrée (*I*) a été calculée par unité de paysage pour trois zones de pluviosité (Sahel septentrional, 200 mm/an ; Sahel méridional, 450 mm/an ; et savane soudanaise septentrionale, 750 mm/an) et ce, pour les années moyennes et pour les années sèches (tableau II.2). La classification en zones de pluviosité est analogue à celle de la partie I : une autre classification est, bien entendu, possible, mais une classification plus détaillée ne semble pas justifiée compte tenu du caractère global de l'évaluation et des informations utilisées.

Tableau II.2
Quantité moyenne d'eau (I en mm/an) par unité de paysage pendant les années moyennes et sèches dans le nord du Sahel (200 mm/an), le sud du Sahel (450 mm/an) et le nord de la savane soudanaise (750 mm/an).

---

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel					

	p50%	170	190	170	110	250
	p10%	85	95	85	55	125
sud du Sahel						
	p50%	270	405	360	225	563
	p10%	180	270	240	150	375
nord de la savane						
	p50%	375	-	-	375	938
	p10%	290	-	-	290	725

II.2.2.3. Estimation de la production d'arbres et d'arbustes

Production

L'étape suivante concerne l'estimation de la production d'arbres et de broussailles, notamment le fourrage des espèces ligneuses (feuille, jeunes tiges et fruits) à partir du taux de recouvrement.

I.2.3.2 décrit dans quelle mesure le taux de recouvrement par les espèces ligneuses est fonction de la pluviosité et du substrat. Ce paragraphe mentionnait déjà que cette relation globale n'était pas très fiable à cause de l'intervention de l'homme (coupe, agriculture et feux de brousse) et de la sécheresse. Il est par conséquent souhaitable d'utiliser des estimations récentes du taux de recouvrement. Dans l'exemple choisi, à défaut d'autres informations, ce sont les relations globales présentées dans la figure I.10 (ligne tracée) qui ont été utilisées. Le point de départ est constitué par la concordance globale entre la classification utilisée dans le cas présent en unités de paysage, et celle de Boudet (1978). L'unité de paysage ED étant supposée être constituée en grande partie par des sols peu profonds, cette unité est assimilée à S_q (note au bas du tableau II.1).

Le tableau II.3 présente le taux de recouvrement probable d'espèces ligneuses sur des pâturages naturels, dans des régions où la densité de population ne dépasse pas 5, 15 et 90 personnes au km2 respectivement dans le Sahel septentrional, le Sahel méridional, et la savane soudanaise septentrionale (I.2.3.2).

Sur le flanc sud de la région, qui est évaluée à titre d'exemple, la densité de population est telle que la surexploitation des espèces ligneuses a dû s'effectuer depuis longtemps («Atlas du Mali», Traoré & Monnier, 1980). Alors que l'Atlas du Mali présente une densité de population de $\geq$ 21 personnes par km^2 (recensement de la population de 1976), la capacité de charge a dû être dépassée depuis 30 ans, compte tenu de la croissance démographique et le peuplement ligneux doit par conséquent être négligeable. Dans les régions avec 14-21 personnes par km2 ce processus s'effectue en 15 à 20 ans. Sur la base de la figure I.10, le taux de recouvrement estimé devrait donc être multiplié par 0,75.

Tableau II.3
Taux de recouvrement estimé des espèces ligneuses (%) dans les unités de paysage de la carte II.3 pour trois zones de pluviosité.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel	-	2	2	2	2
sud du Sahel	16	3,5	3,5	18	10
nord de la savane	27	-	-	27	40

La production annuelle de feuilles peut être calculée à partir de l'estimation du taux de recouvrement, sur la base du nombre moyen de couches de feuillage d'arbres et d'arbustes. Des productions mesurées peuvent être simulées raisonnablement en augmentant le nombre moyen de couches de feuillage depuis 2 dans le Sahel, jusqu'à 6 pour [3] 1300 mm de précipitations moyennes dans la savane, sur des sols relativement bons et profonds. Une répartition hétérogène de l'eau influence non seulement le recouvrement, mais également la production. Voilà pourquoi la relation présentée dans le tableau II.4 présuppose une relation entre la pluviosité moyenne, la quantité d'eau infiltrée et le nombre de couches de feuillage. Pour ce cas précis, la durée de vie moyenne des feuilles a été supposée inférieure à un an.

Tableau II.4
Nombre moyen de couches de feuillage d'espèces ligneuses pour une pluviosité moyenne (P) et une quantité d'eau infiltrée croissantes (I).

P *(mm/an)*	*I* *(mm/an)*	nombre de couches de feuillage
< 500	< 400	2
500-750	400-550	3
750-1000	550-700	4
1000-1300	700-900	5
≥ 1300	≥900	6

Une couche de feuillage est une grandeur théorique, qui se compose d'une mosaïque de feuilles, qui posées côté à côte ne présente ni chevauchement ni vide. Aussi, le poids peut être dérivé du poids spécifique de la feuille. Des valeurs de 10 à 14 mg/cm2 sont normales pour la région. Les évaluations sont basées sur une moyenne de 12 mg/cm2, soit 1200 kg/ha.

Le tableau II.6 indique les résultats de l'évaluation de la production de feuilles des espèces ligneuses pour les unités de paysage sélectionnées (carte II.3) : la combinaison de la quantité moyenne d'eau infiltrée (*I*) par unité de paysage (tableau II.2) et de la pluviosité, donne à l'aide du tableau II.4 le nombre de couches de feuilles (tableau II.5) ; ce nombre multiplié par 1200 kg/ha et par le taux de recouvrement (tableau II.3), fournit la production de feuilles en kg/ha.

Tableau II.5
Nombre estimé de couches de feuillage d'espèces ligneuses dans les unités de paysage de la carte II.3 pour trois zones de pluviosité.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel	-	2	2	2	2
sud du Sahel	2	2	2	2	4
nord de la savane	2	-	-	2	6

Tableau II.6
Production estimée de feuilles (kg/ha par an) pour les unités de paysage de la carte II.3 pendant les années à pluviosité moyenne sur un peuplement d'espèces ligneuses non entamé par la surexploitation.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel	-	48	48	48	48
sud du Sahel	384	84	84	432	480
nord de la savane	648	-	-	648	2880

La production de feuilles multipliée par 1,5, permet d'obtenir la production de fourrage d'espèces ligneuses pour une année moyenne. Afin d'évaluer la production d'une année sèche, il suffit de se baser sur une diminution directement proportionnelle entre la production et la pluviosité. La figure II.1 permet donc d'obtenir le coefficient correcteur par lequel il faut multiplier la production pendant une année moyenne : 100/200 = 0,5 pour l'isohyète de 200 mm, 300/450 = 0,67 pour l'isohyète de 450 mm et 580/750 = 0,77 pour l'isohyète de 750 mm (tableau II.7).

Tableau II.7
Production estimée de pâturage aérien (kg/ha) pour les unités de paysage de la carte II.3 pendant les

années moyennes et sèches.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel					
p50%	-	72	72	72	72
p10%	-	36	36	36	36
sud du Sahel					
p50%	576	126	126	648	720
p10%	384	84	84	432	480
nord de la savane					
p50%	972	-	-	972	4320
p10%	752	-	-	752	3341

La production de feuilles permet non seulement de calculer la quantité totale de fourrage ligneux, mais également la production seule de feuilles plus fruits ; pour ce faire, il faut multiplier la production de feuilles par 1,15 (tableau II.8). Ces chiffres relatifs à la production seront utilisés dans II.2.2.4 pour estimer la production de la strate herbacée dans des situations probables de forte concurrence entre les espèces ligneuses et les composants de la strate herbacée de la végétation.

Tableau II.8
Production estimée (kg/ha) de feuilles et de fruits d'espèces ligneuses pour les unités de paysage de la carte II.3 pendant les années à pluviosité moyenne.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel	-	55	55	55	55
sud du Sahel	442	97	97	496	552
nord de la savane	745		-	745	3312

Taux d'éléments nutritifs et digestibilité

Le taux d'éléments nutritifs des feuilles des espèces ligneuses est généralement bien supérieur à celui de la strate herbacée. Certaines indications tendent à prouver que cela est lié à la constitution de réserves d'éléments nutritifs propres à ces espèces. Ceci expliquerait d'ailleurs la très faible baisse du taux d'éléments nutritifs dans le cas d'augmentation du volume des précipitations ; situation opposée à celle de la strate herbacée (figure II.3). La disponibilité relative de l'eau et des éléments nutritifs semble donc de moindre importance pour les espèces ligneuses. C'est la raison pour laquelle une exploitation fréquemment intensive fait baisser le taux des éléments nutritifs.

Le tableau II.9 indique pour trois zones climatiques, les taux moyens d'azote des feuilles en fonction de leur âge. Les légumineuses sont mentionnées séparément, car le taux d'azote des anciennes feuilles de ces espèces ligneuses est relativement élevé.

Tableau II.9
Taux d'azote (g/kg de matière sèche) des feuilles de légumineuses et d'autres espèces ligneuses par zone climatique en fonction de l'âge des feuilles.

	légumineuses			autres espèces ligneuses		
	nord du Sahel	sud du Sahel	savane	nord du Sahel	sud du Sahel	savane
feuilles juvéniles	-	37	24	30	29	-
toutes feuilles	27	29	24	26	24	21
vieilles feuilles	22	24	19	13	14	10

Compte tenu du taux de légumineuses dans le peuplement des espèces ligneuses (environ 20 % du total du recouvrement), le taux d'azote pour toutes les feuilles à la fin de la saison des pluies peut être évalué à 26, 25 et 22 g/kg de matière sèche, respectivement pour le Sahel septentrional, le Sahel méridional et la zone soudanaise.

Le taux d'azote moyen des fruits étant approximativement 0,75 fois celle des feuilles, et celui des rameaux feuillés 0,65 fois, il faut pour déterminer le taux d'azote du fourrage ligneux, multiplier le taux d'azote de la feuille par 0,7. Dans l'exemple choisi, le taux d'azote du fourrage ligneux à la fin de la saison des pluies est donc de 18, 17,5 et 15,5 g/kg de matière sèche pour respectivement le Sahel septentrional, le Sahel méridional et la savane soudanaise septentrionale. Compte tenu des taux d'azote des anciennes feuilles (tableau II.9), ce taux diminuera pendant la saison sèche à respectivement 10, 11 et 9 g/kg de matière sèche.

Par rapport aux autres caractéristiques de qualité, telles le taux de phosphore et la digestibilité, des données moins détaillées sont disponibles. Une différenciation entre les légumineuses et les autres espèces ligneuses est alors inutile.

Le taux de phosphore de la matière sèche passe de 2 à 3 g/kg pour les jeunes feuilles, à 1 à 1,5 pour les feuilles anciennes. La digestibilité de la matière organique varie pour les jeunes feuilles entre 40 et 75 % ; des valeurs de 15 à 60 % ont été constatées dans les anciennes feuilles. Suggestion est faite d'appliquer un taux de 60, 50 et 40 % pour respectivement les feuilles jeunes, toutes les feuilles à la fin de la saison des pluies, et les feuilles anciennes des espèces appétées (figure III.20f).

Le taux d'éléments nutritifs et donc de la qualité du fourrage ligneux semble élevé en comparaison de celui de la couche herbacée (II.2.2.4). Cette image est cependant flatteuse, à cause de la présence de facteurs anti-nutritionnels, tels que les tannins dans les feuilles d'arbres et d'arbustes, qui exercent une influence négative sur la digestibilité des protéines et des matières organiques. Notamment pour les bovins et les moutons, l'utilité du fourrage ligneux se trouve ainsi diminuée. Le peu de connaissances en la matière et l'existence de grandes différences parmi les diverses espèces ligneuses (constatation de variations du taux de tannin de 0 à 250 g/kg) ont conduit à faire un choix pour décrire les deux extrêmes de la situation fourragère : d'une part la situation où l'offre en fourrage des espèces ligneuses est entièrement négligée, ce qui sous-estime quelque peu la situation fourragère réelle pour les bovins et les moutons, et d'autre part une situation où les espèces ligneuses sont entièrement prises en compte, ce qui constitue une surévaluation de la situation fourragère pour les chèvres et les dromadaires. Une méthode plus précise est décrite dans II.5.6.2 et étayée dans III.3.4.2.2.

II.2.2.4. Evaluation de la production de la strate herbacée

Production et taux d'azote pendant les années à pluviosité moyenne

Dans la plupart des cas, la production et le taux d'azote de la strate herbacée peuvent être obtenus pour chaque unité de paysage à partir des figures II.2 et II.3, sur la base de la pluviosité des années moyennes et des coefficients de ruissellement estimés (tableau II.1). Il existe cependant un certain nombre d'exceptions pour lesquelles une autre approche est utilisée, à savoir :
- dans le cas où la prédominance d'espèces ligneuses influence fortement la production de la strate herbacée (taux de recouvrement par les espèces ligneuses supérieur à 15 %, deux couches de feuillage ou plus, ou encore taux de recouvrement inférieur à 15 %, mais plus de deux couches de feuillage, ce qui entraîne une production de feuilles supérieure à 360 kg/ha pour une année normale) ;
- présence de sols peu profonds, entraînant des pertes d'eau par percolation, ce qui rend caduque les relations des deux figures.

La première exception se présente dans l'exemple pour l'unité F_{sh} (Sahel méridional et savane soudanaise septentrionale), et la seconde pour l'unité ED (Sahel méridional et savane soudanaise septentrionale).

Procédure générale
La figure II.2 donne la relation entre les précipitations et la biomasse produite pour une infiltration homogène (R = 0 ; $I = P$), pour un coefficient de ruissellement de 0,5 (R = 0,5 ; $I = (1-0,5) \times P = 0,5 \times$

P) et pour un coefficient de ruissellement de -0,5 (concentration des écoulements, R = -0,5 ; *I* = (1-(-0,5)) × *P* = 1,5 × *P*).

Figure II.2
Production de la biomasse (en matière sèche) par la strate herbacée, par rapport à la pluviosité pendant les années moyennes (p50%) pour trois situations : infiltration homogène (I = 1,0 × P), ruissellement (R = 0,5 ; I = 0,5 × P) et concentration des écoulements (R = -0,5 ; I = 1,5 × P).

Pour obtenir cette figure, la procédure utilisée a été la suivante :
- Le point de départ est constitué par la quantité d'eau infiltrée (*I*), telle qu'elle peut être calculée par l'équation II.1 à partir des précipitations (*P*) et du coefficient de ruissellement (R).
- Pour *I* ú 250 mm, on a supposé que le facteur le plus limitatif pour la croissance végétale est l'eau. Dans ce cas, la biomasse a été calculée à l'aide d'une équation, résultant des calculs obtenus avec un modèle de simulation. Ce modèle décrit le bilan hydrique ainsi que la relation entre la disponibilité en eau et la croissance (II.3.4 ; III.2.2.1).
- Pour *I* > 250 mm on suppose que le facteur le plus limitatif pour la croissance des végétaux est l'azote. La biomasse est alors calculée au moyen d'une équation basée sur le bilan d'azote (II.3.4 ; III.2.2.2).

La figure II.3 indique la relation entre la pluviosité et le taux d'azote dans la biomasse aérienne pour les trois situations identiques à celle de la figure II.2. La figure II.3 a été constituée à partir de quelques hypothèses commentées plus loin (III.2.5).

Figure II.3
Taux d'azote (g/kg de matière sèche) de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance, par rapport à la pluviosité pendant les années moyennes (p50%) pour trois situations : infiltration homogène (I = 1,0 × P), ruissellement (R = 0,5 ; I = 0,5 × P) et concentration des écoulements (R = -0,5 ; I = 1,5 × P).

Pour illustrer ce qui précède, les évaluations de la production de la biomasse et le taux d'azote de deux unités de l'exemple ont été développées (carte II.3).

L'unité de paysage S_a présente un coefficient de ruissellement de 0,20 dans le cas d'une pluviosité de 450 mm et la production de la biomasse est de 2400 kg/ha pour une infiltration homogène et de 800 kg/ha pour un coefficient de ruissellement de 0,50 (figure II.2). La production de la biomasse pour un coefficient de ruissellement de 0,20 est obtenue par interpolation linéaire :

2400 - (0,20/0,50 × (2400 - 800)) = 1760 kg/ha.

Le taux d'azote est, pour 450 mm, de 6,4 et de 10,3 g/kg de matière sèche pour une infiltration homogène et pour un coefficient de ruissellement de 0,50 respectivement (figure II.3). Le taux d'azote

pour un coefficient de ruissellement de 0,20 découle également de l'interpolation linéaire :

$$6,4 + (0,20/0,50 \times (10,3 - 6,4)) = 8,0 \text{ g/kg de matière sèche.}$$

Le coefficient de ruissellement de l'unité F_{sh} est de -0,25 pour 200 mm de pluviosité (tableau II.1). La production de la biomasse en présence de cette pluviosité est de 800 et de 1750 kg/ha respectivement pour une infiltration homogène et pour un coefficient de ruissellement de -0,50 (figure II.2). La production de la biomasse pour un coefficient de ruissellement de -0,25 est de :

$$800 + (0,25/0,50 \times (1750 - 800)) = 1275 \text{ kg/ha.}$$

Le taux d'azote pour 200 mm de pluie est de 11,5 et 7,5 g/kg de matière sèche respectivement pour une infiltration homogène et un coefficient de ruissellement de -0,50 (figure II.3). Le taux d'azote pour un coefficient de ruissellement de -0,25 est alors :

$$11,5 - (0,25/0,50 \times (11,5 - 7,5) = 9,5 \text{ g/kg de matière sèche.}$$

Exceptions
Dans des situations où la concurrence pour l'obtention d'éléments nutritifs laisse supposer une influence considérable des espèces ligneuses sur la production de la strate herbacée, la méthode présentée en III.2.6 sera utilisée. Il s'agit d'évaluer en premier lieu la quantité moyenne d'azote qui est absorbée annuellement dans la biomasse aérienne de la strate herbacée et dans celle des espèces ligneuses (Nlh ; l = ligneux, h = herbacé). Tout comme pour l'évaluation de l'azote dans la biomasse aérienne de la seule strate herbacée (N_b ; II.3.4 et III.2.2.2), l'évaluation de N_{lh} se fait à l'aide de l'équation suivante :

$$N_{lh} = 0,0083 \times I / (f_{lh} - 0,13) \qquad \text{(équation II.2)}$$

dans laquelle :
N_{lh} = la quantité moyenne d'azote (kg/ha) dans la biomasse aérienne annuelle de la strate herbacée, et celle des feuilles et des fruits des espèces ligneuses, en situation d'équilibre (III.2.6) ;
f_{lh} = la part de N_{lh}, qui se perd annuellement par suite de différents processus ;
I = la quantité d'eau infiltrée (mm/an).

La part de pertes annuelles (flh) est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$f_{lh} = (rc \times f_{li}) + (1 - rc) \times f \qquad \text{(équation II.3)}$$

dans laquelle :
rc = le taux de recouvrement par les espèces ligneuses (tableau II.3) ;

f_{li} = la part de la quantité moyenne d'azote dans la production annuelle des feuilles et des fruits des espèces ligneuses, qui se perd annuellement
(f_{li} = 0,4 × f, avec un minimum de 0,2 ; III.2.6) ;

f = la part de la quantité moyenne d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée qui se perd annuellement.

La valeur de f pourrait être estimée à l'aide de données obtenues sur le terrain au cours d'une période de plusieurs années (II.3 et II.2.2.3). L'évaluation globale peut cependant se baser sur la figure II.4, qui donne la relation entre la pluviosité moyenne et la valeur de f. Cette relation est basée sur des observations effectuées pendant 4 ans au Mali sur un trajet nord-sud.

Figure II.4
Valeurs de la fraction moyenne de N_b perdue annuellement (f) par rapport aux isohyètes.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 305 .

Pour l'unité F_{sh} dans le Sahel méridional (pluviosité 450 mm/an), à laquelle se rapporte cette exception (rc = 0,1, mais plus de 2 couches de feuillage), f_{lh} aurait une valeur de 0,35 (f = 0,36, figure II.4 ; f_{li} = 0,2) et N_{lh} une valeur de 21,3 kg/ha (I = 563 mm/an, tableau II.2).

L'étape suivante est le calcul de la part de N_{lh} disponible pour la strate herbacée. Ce calcul se fait en déduisant de N_{lh} la quantité d'azote qui est absorbée annuellement par les espèces ligneuses en concurrence avec la strate herbacée. Cette quantité résulte de l'hypothèse (III.2.6) selon laquelle la quantité d'azote absorbée en concurrence avec la strate herbacée, correspond à la quantité d'azote des feuilles et des fruits multipliée par 0,4 et diminuée d'une quantité fixe due à la différenciation de niches écologiques (4 kg/ha). La quantité d'azote dans les feuilles et fruits d'arbres découle de la production de matière sèche ainsi que du taux moyen d'azote des feuilles et des fruits à la fin de la période des pluies ; ce taux est égal à 0,97 fois la teneur d'azote de la feuille à ce moment. Compte tenu de la précision des autres évaluations, c'est le taux d'azote des feuilles qui est retenu.

Dans l'exemple, l'unité F_{sh} du Sahel méridional, le taux d'azote des feuilles est de 25 g/kg (II.2.2.3 ; sous-titre « taux d'éléments nutritifs et digestibilité »), la production de feuilles et de fruits de 552 kg/ha (tableau II.8) et la quantité d'azote dans les feuilles et les fruits est donc 0,97 × 25/1000 × 552 = 13,4 kg/ha.

La quantité d'azote qui est absorbée en concurrence avec la strate herbacée, est de (0,4 × 13,4) - 4 = 1,4 kg/ha. La quantité d'azote dans la strate herbacée est donc, dans le présent exemple égale à : 21,3 - 1,4 = 19,9 kg/ha.

Et finalement, la biomasse de la strate herbacée peut être calculée à l'aide du taux d'azote (figure II.3). Pour l'unité F_{sh} dans le Sahel méridional ceci équivaut à 6,1 g/kg de matière sèche, la biomasse étant ainsi égale à (19,9/6,1) × 1000 = 3260 kg/ha. Pour la même unité dans la savane soudanaise septentrionale, pour laquelle cette exception est également d'application, la quantité d'azote dans la strate herbacée ainsi que le taux d'azote et la biomasse correspondent respectivement à 13,5 kg/ha, 5,4 g/kg et 2500 kg/ha.

Une seconde exception est constituée par les unités à sols peu profonds, telle que l'unité ED de l'exemple (carte II.3) et par les situations où a lieu de la percolation en dessous de 2 m. La méthode provisoire présentée est encore peu testée ; les résultats devront être utilisés avec précaution. Une partie de l'azote fournie annuellement par les sources naturelles, est supposée ne pas être disponible pour la végétation. Ces pertes proviennent d'une lixiviation par l'eau lorsque les sols ont une profondeur inférieure à 2 mètres (profondeur maximum supposée des racines de la strate herbacée) et dans le cas de percolation en dessous de 2 m. La quantité d'azote lessivée est supposée proportionnelle à la quantité d'eau de percolation sortant du profil, la quantité d'azote par unité d'eau de percolation étant supposée égale à la quantité d'azote qui entre dans le système par unité d'eau d'infiltration (III.2.3). Dans de telles situations, il faut donc commencer par déduire la quantité d'eau de percolation de la quantité d'eau infiltrée, avant de déterminer la production de la biomasse et le taux d'azote.

La quantité d'eau de percolation est une fonction du taux d'humidité pour pF 2,5, profondeur du sol et quantité d'eau infiltrée (III.2.3). Elle peut être calculée à l'aide d'une équation empirique :

$$Pe = 0{,}69\ I - 45\ H - 0{,}22\ pr - 7{,}8\ (H \times pr) - 74 \qquad \text{(équation II.4)}$$

dans laquelle :
Pe = les pertes d'eau par le bas du profil (mm/an) ;
I = la quantité d'eau infiltrée (mm/an) selon l'équation II.1 ;
H = taux d'humidité à pF 2,5 = capacité au champ (cm^3/cm^3) ;
pr = profondeur du sol (cm ; au maximum 200, la profondeur maximum des racines de la strate herbacée).

Dans le cas des estimations globales, la figure III.19 peut être utilisée comme alternative pour l'équation. Lorsque le taux d'humidité pour pF 2,5 n'est pas connu, il est possible de le déduire de la texture du sol à l'aide de l'équation suivante (III.2.3) :

$$H = 0{,}014\ (37 - 0{,}35\ TS) \qquad \text{(équation II.5)}$$

dans laquelle :
TS = taux en sable = la fraction pondérale des grains avec un diamètre de 50-2000 µ (%).

Pour l'unité de paysage ED dans l'exemple, la profondeur moyenne du sol (*pr*) a été supposée de 50 cm.

Dans le Sahel septentrional, un profil de 50 cm avec un taux de sable supposé de 80 % ne sera pas entièrement humidifié. Ceci peut être vérifié au moyen de l'équation suivante ou, avec moins de précision, relevé sur la figure III.13 :

$$pr_h = a\ (I - 69)/1{,}15 \qquad \text{(pour } I > 69 \text{ mm ; équation II.6)}$$

dans laquelle :
a = variable dépendante du taux d'humidité à la capacité au champ (*H* ;) ;
pr_h = profondeur d'humidification du profil (cm).

La valeur de a est de 0,52 pour une capacité au champ de 0,13 cm³/cm³ (calculé à l'aide de l'équation II.5, sur la base d'un taux en sable de 80 %). Donc dans le Sahel septentrional, pour un *I* de 170 mm (tableau II.2), la profondeur de l'humidification (pr_h) sera égale à 46 cm, et pour la profondeur supposée du sol (*pr*) de 50 cm, il ne sera pas encore question de pertes (*Pe* = 0) hors du profil. Dans cette situation, la production de la biomasse et le taux d'azote peuvent être obtenus à l'aide de la procédure générale décrite ci-avant à partir des figures II.2 et II.3.

Figure II.5
Rapport entre la variable a (voir explication dans III.2.3) et le taux d'humidité à la capacité au champ (H).

Dans le Sahel méridional et le nord de la savane soudanaise, cette unité présente des pertes par percolation, bien que les sols y soient plus lourds (taux en sable respectivement de 75 et 60 %). Pour un *I* de 270 mm (tableau II.2), une profondeur du sol de 50 cm et une capacité au champ de 0,15 cm³/cm³, *Pe* équivaut dans le Sahel méridional à 36 mm conformément à l'équation II.4. Dans le nord de la savane soudanaise, *Pe* est égal à 78 mm si on se base sur une capacité au champ de 0,22 cm3/cm3 (*I* de 375 mm ; tableau II.2).

Pour ces situations, le calcul de la quantité d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée (N_b en kg/ha) intervient ensuite à l'aide de l'équation suivante (II.3.4 et III.2.2.2) :

$$N_b = 0{,}0083\ (I - Pe) / (f - 0{,}13) \qquad \text{(équation II.7)}$$

(*Pe* = 0, quand des graminées pérennes dominent la strate herbacée ; III.2.3)

La valeur de f peut à nouveau être obtenue à partir de la figure II.4 ; elle est de 0,36 pour le Sahel méridional et de 0,425 pour le nord de la savane soudanaise. En introduisant ces valeurs dans l'équation II.7, ainsi que les valeurs obtenues pour *Pe* et celles de *I* résultant du tableau II.2, on obtient pour N_b de l'unité ED des valeurs de 8,4 kg/ha dans les deux cas (en négligeant un moment la présence des espèces

ligneuses ; voir ci-dessus).

A l'aide du taux d'azote (figure II.3 : pour l'unité en question 9,0 et 7,0 g/kg de matière sèche respectivement au Sahel méridional et dans le nord de la savane soudanaise), il est maintenant possible de calculer la production de la biomasse : 930 et 1200 kg/ha dans le Sahel méridional et le nord de la savane soudanaise.

Le tableau II.10 rassemble, pour toutes les unités de l'exemple, les évaluations de la production de la biomasse, le taux d'azote et les valeurs N_b pendant les années à pluviosité moyenne. Partout où le recouvrement ligneux dépasse 15 % (tableau II.3), on en a tenu compte.

Tableau II.10
Production de la biomasse (kg/ha), taux d'azote (g/kg de matière sèche) et N_b (kg/ha) de la strate herbacée pendant des années à pluviosité moyenne pour les unités de la carte II.3.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel					
- biomasse	568	775	620	160	1275
- taux d'azote	14,6	12,5	14,7	21,3	9,5
- N_b	8,3	9,7	9,1	3,4	12,1
sud du Sahel					
- biomasse	1000	2065	1760	850	3260
-taux d'azote	9,0	7,6	8,0	12,9	6,1
- N_b	9,2	15,7	14,1	11,0	19,9
nord de la savane					
- biomasse	1200	-	-	1600	2525
- tauxd'azote	7,0	-	-	7,0	5,4
- N_b	8,4	-	-	11,2	13,5

Taux d'azote de la strate herbacée à la fin de la période sèche

Le taux d'azote de la strate herbacée diminue au cours de la saison sèche par suite des feux de brousse, des pluies tardives ou précoces, de la voracité, etc. (I.2.4). La partie I mentionne que le taux d'azote (g/

kg de matière sèche) de la strate herbacée à la fin de la saison sèche ($[N]_{ss}$) peut être obtenu à partir du taux d'azote à la fin de la saison des pluies ($[N]_{sp}$) :

$$[N]_{ss} = 0{,}44\ [N]_{sp} + 1{,}27 \qquad \text{(équation II.8)}$$

Cette équation est basée sur une analyse linéaire de régression des données obtenues sur le terrain, et rassemblées pendant une période de 4 ans le long d'un trajet nord-sud au Mali (figure II.6). Il ressort de cette figure, que la dispersion est grande. Ceci n'est pas étonnant, car les processus qui occasionnent la diminution du taux d'azote peuvent varier en fonction de l'endroit et de l'année. L'équation permet cependant d'obtenir une image convenable du taux d'azote pendant la saison sèche dans le cadre d'une évaluation globale.

Figure II.6
Rapport entre le taux d'azote à la fin de la saison sèche ($[N]_{ss}$) et le taux d'azote à la fin de la saison des pluies ($[N]_{sp}$) ; ce rapport est basé sur les données obtenues sur le terrain pendant 4 ans sur un trajet nord-sud au Mali.

Taux de phosphore et digestibilité

Des caractéristiques autres que le taux d'azote ont leur importance pour la qualité, tels le taux de phosphore et la digestibilité. Dans une première approche, pour la strate herbacée, ces caractéristiques peuvent être obtenues à partir du taux d'azote.

Le taux de phosphore atteindra dans de nombreux cas environ 0,1 du taux d'azote. Quelques variations peuvent cependant apparaître : le rapport P/N peut se situer globalement entre 0,04 et 0,16 (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 214). Un taux de phosphore relativement bas (faible rapport P/N) peut se présenter dans des sols à taux de phosphore très faible, que ce soit de par la nature du sol ou par épuisement ; alors qu'un taux de phosphore relativement élevé (fort rapport P/N) peut se présenter dans des sols qui sont naturellement riches en phosphates ou enrichis par les engrais. C'est le cas de sols autour des points d'abreuvement et des villages, où les concentrations de fumier permettent d'enrichir considérablement les sols, notamment avec du phosphore (tableau I.4). Pour une évaluation globale, il s'agira cependant d'appliquer la règle générale : $[P] = 0{,}1 \times [N]$.

La digestibilité est également soumise à de fortes variations. En ce qui concerne la strate herbacée des pays sahéliens, il existe une relation certaine entre le taux d'azote et la digestibilité (III.3).

Production et taux d'azote pendant les années sèches (p10%)

Pour évaluer la production de la strate herbacée pendant les années sèches, il faut se baser sur la quantité

d'azote dans la biomasse aérienne (N_b) au cours des années à pluviosité moyenne (p50% ; tableau II.10). Seule une fraction de cette quantité est supposée disponible pour la végétation pendant les années sèches, car une diminution de la pluviosité ne permet pas d'humidifier le profil en profondeur. La fraction par laquelle le N_b des années moyennes doit être multiplié pour calculer le rendement d'azote d'une année sèche (N_{10}), est le rapport entre la fraction des années sèches (F_{10}) et celle des années moyennes (F_{50}) et dépend de la profondeur de l'humidification du profil pendant les années sèches et moyennes (III.2.3).

$$N_{10} = F_{10}/F_{50} \times N_b \qquad \text{(équation II.9)}$$

Les profondeurs d'humidification du profil calculées et présentées dans la permettent de retrouver les fractions F_{10} et F_{50}. La profondeur d'humidification du profil (pr_h) pendant les années sèches et pendant les années moyennes, peut être calculée à l'aide de l'équation II.6, en utilisant la valeur de *I* pour les années sèches et moyennes (tableau II.2) ainsi que la variable a (figure II.5). Cette variable peut à son tour être calculée à l'aide de l'équation II.5 pour un taux de sable donné.

Pour illustrer ce qui précède, voici le calcul de N_b pendant les années sèches pour l'unité $F_{éc}$ dans le Sahel méridional. La teneur en sable des sols de cette unité a été fixée à 60 %. Par l'équation II.5, on obtient un taux d'humidité pour pF 2,5 de 0,22 cm³/cm³. La valeur de a pour ce taux d'humidité est de 0,34 (figure II.5). Selon l'équation II.6, la profondeur d'humidification (pr_h) est de 46 cm pendant les années moyennes pour un *I* de 225 mm (tableau II.2). Pendant les années sèches, elle atteint 24 cm (*I* = 150 mm). La figure II.7 permet maintenant d'obtenir les valeurs F_{10} et F_{50} : respectivement 0,33 et 0,59. Le facteur par lequel il faut multiplier le N_b des années moyennes est égal à 0,33/0,59 = 0,56. Le N_b pour l'unité Féc pendant les années moyennes est de 11,0 (tableau II.10), donc le N_b pendant les années sèches est 11,0 × 0,56 = 6,2 kg/ha.

Figure II.7
Fraction d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée (N_b) par rapport à la profondeur d'humidification du profil (pr_h).

Le taux d'azote pendant les années sèches résulte d'une interpolation linéaire de la figure II.3, en supposant que l'axe x représente la valeur de la pluviosité pendant les années moyennes aussi bien que pendant les années sèches. N_b ainsi que le taux d'azote permettent à nouveau de calculer la biomasse de la strate herbacée. Le tableau II.11 réunit le N_b, le taux d'azote et la production de la biomasse des unités de l'exemple, pendant les années sèches. Les taux de sable ont été fixés à : 95, 90, 60 et 35 % pour respectivement les unités S_d, S_a, $F_{éc}$ et F_{sh}.

Tableau II.11
Production de la biomasse (kg/ha), taux d'azote (g/kg de matière sèche) et N_b (kg/ha) de la strate herbacée pendant des années sèches pour les unités de la carte II.3.

	unité de paysage				
	Dé	S_d	S_a	$F_{éc}$	F_{sh}
nord du Sahel (100 mm/an)					
-biomasse	48	165	75	-	205
- taux d'azote	25,0	23,0	25,0	-	16,5
- N_b	1,2	3,8	1,9	-	3,4
sud du Sahel (290 mm/an)					
- biomasse	673	1540	1035	400	2333
- taux d'azote	11,3	10,0	11,3	15,5	7,5
- N_b	7,6	15,4	11,7	6,2	17,5
nord de la savane (580 mm/an)					
- biomasse	940	-	-	1275	2015
- taux d'azote	8,2	-	-	8,0	5,8
- N_b	7,7	-	-	10,2	11,7

Exception
Il existe une exception à cette procédure : il s'agit de situations où, pendant les années moyennes, des pertes d'eau se produisent hors du profil (*Pe* > 0). C'est ce qui se passe dans l'exemple pour l'unité ED dans le Sahel méridional et dans le nord de la savane soudanaise. Dans ces cas, le calcul pour les années sèches doit également être effectué selon le procédé présenté pour les mêmes situations pendant les années moyennes : calcul des pertes hors du profil (*Pe*) pendant les années sèches, à déduire de *I* correspondant aux années sèches, avant de calculer le N_b, le taux d'azote et la production de la biomasse.

Pour l'unité ED, l'exemple est basé sur des taux de sable de 80 et 60 % pour des sols au Sahel (méridional et septentrional) et de la savane soudanaise (du nord et du sud) respectivement.

Production de graminées pérennes

En ce qui concerne la méthode de calcul présentée pour l'évaluation de la production de la strate herbacée, la présence éventuelle de graminées pérennes très productives (tableaux IV.1 et IV.2) n'a pas

été prise en ligne de compte. A la fin du cycle de croissance, il y a au niveau de pareilles graminées pérennes, une translocation des hydrates de carbone et des éléments nutritifs vers le système radical. C'est pourquoi, pendant la saison sèche, les pertes en azote sont moindres que pour les annuelles. Il en résulte une plus faible valeur f ; ainsi le N_b, et donc la biomasse, doivent être évalués à un niveau plus élevé. Lorsque le taux de recouvrement par les graminées pérennes est connu, une correction peut être apportée. La méthode de calcul adéquate est décrite dans II.3.5.

Outre une production plus élevée pendant la saison des pluies, il faut tenir compte d'une certaine croissance des graminées pérennes pendant la saison sèche. La partie I fournissait déjà quelques données concernant la production de graminées pérennes pendant la saison sèche (tableau I.12). La figure III.35 montre le rapport entre l'importance des repousses et le niveau de production de la saison de pluies. Il devient ainsi possible d'estimer le rendement des repousses pendant la saison sèche à condition de connaître la biomasse à la fin de la saison de croissance principale :

$$RE = 0{,}064\ B + 100 \qquad \text{(équation II.10)}$$

dans laquelle :
RE_{pl} = repousses (kg/ha) pour des régions exondées ;
B = biomasse à la fin de la saison de croissance principale (kg/ha).

II.2.2.5. Plaines d'inondation et zones agricoles

Dans un certain nombre de cas, la méthode de calcul décrite ci-après pour la production végétale, ne pourra convenir. Les plaines d'inondation (unité F_{in}) et les régions irriguées (F_{ir}) ont déjà été mentionnées. Il en va de même pour les zones à production agricole, car l'intervention humaine peut exercer sur la production une influence positive (mesures prises en faveur de la culture, application d'engrais, etc.) ou négative (par exemple épuisement du sol) par rapport à la production prévisible compte tenu du paysage et du climat. Bien que les zones agricoles, tout comme les zones irriguées, fournissent avant tout des produits pour la consommation directe de l'être humain, elles ne peuvent être absentes d'une analyse de l'élevage, puisque les sous-produits conviennent à cette activité.

Pour évaluer la production des pâturages de ces régions, il faudra faire appel aux données des ouvrages spécialisés. La partie I proposait déjà quelques données relatives à l'unité F_{in} de cet exemple (tableau I.13). A l'aide de l'équation dérivée de la figure III.35, il est possible d'estimer le rendement des repousses :

$$RE_{in} = 0{,}21\ B - 650 \qquad (B \geq 5000 \text{ kg/ha ;équation II.11})$$

dans laquelle :

RE_{in} = repousses après retrait de l'eau d'inondation (kg/ha) ;

B = biomasse à la fin de la saison de croissance principale (kg/ha).

Dans le cas d'inondation restreintes et de valeurs de $B < 5000$ kg/ha, c'est-à-dire en bordure des plaines d'inondation, il faut utiliser l'équation II.10. Pour une évaluation de la quantité des sous-produits en provenance des zones agricoles, on peut utiliser les statistiques de rendement concernant par exemple le produit principal. A l'aide de l'estimation des relations entre le produit principal et les sous-produits, il est possible de calculer la disponibilité en sous-produits. L'utilisation de ces relations comporte un risque, car elles varient fortement en fonction du niveau d'application d'engrais, des précipitations pendant les phases de croissance et des variétés utilisées (de Ridder et al., 1981).

Une telle évaluation a déjà été réalisée pour les zones agricoles mentionnées dans l'exemple (Breman & Traoré, 1987). Les chiffres de production des grains, présentés par le service agricole malien pour cette région, étaient en 1981 et 1982 pour le mil, le sorgho et le riz respectivement de 440, 500 et 860 kg/ha. En se basant sur les rapports grain/paille de 0,125 (mil), 0,25 (sorgho) et 0,35 (riz), ceci correspond à des productions de paille de 3520, 2000 et 2450 kg/ha pour respectivement le mil, le sorgho et le riz. Pour les sous-produits des grains (son, farines basses), il est d'usage de prendre 0,1 de la production des céréales ; donc, pour les productions ci-dessus 44, 50 et 86 kg/ha pour respectivement le mil, le sorgho et le riz.

Compte tenu des niveaux actuels de fertilisation, la qualité de la majorité des sous-produits agricoles est faible. Le taux d'azote de la paille par exemple, dépasse rarement 5 g/kg. La qualité du son et des farines basses est généralement meilleure (environ 15 g/kg). Pour toutes données concernant la qualité des sous-produits, on peut se référer à Rivière (1978).

II.2.3. Disponibilité en fourrage

L'évaluation de la disponibilité en fourrage s'effectue sur la base de la qualité et du niveau de la production végétale des pâturages, ainsi que sur les sous-produits des zones agricoles. Il est ainsi possible d'évaluer une région en termes de capacité de charge - comme cela a été fait dans la partie I pour la totalité des pays sahéliens -. A la suite de pertes, seule une partie de la production sera réellement disponible pour le bétail. Pour la strate herbacée, la part des pertes est estimée à 50 et 65 % respectivement pour la saison des pluies et pour la moyenne annuelle (I.2.5). Pour la paille, cette part est estimée à 65 %, alors que, pour les sous-produits des grains, les pertes sont estimées à 20 % (I.3.3.1). Les productions calculées doivent être corrigées à l'aide de ces coefficients afin d'obtenir une évaluation de la disponibilité en fourrage.

La production annuelle des pâturages aériens n'est elle aussi que partiellement disponible. La disponibilité du fourrage ligneux est déterminée par le niveau d'exploitation maximum admissible, (sans porter atteinte à la production des années suivantes), l'accessibilité pour le bétail, et la phénologie.

Des expériences à court terme révèlent des rapports très changeants entre la pression d'exploitation et le

niveau de production. La production peut diminuer ou augmenter dans le cas d'une pression d'exploitation croissante, en fonction de l'espèce, du moment de l'exploitation et de l'intensité. Dans le cadre d'une analyse de la capacité de charge, l'accent est mis cependant sur le niveau d'exploitation qui garantit une production moyenne stable.

L'utilisation de 25-60 % de la production annuelle de feuilles, semble possible sans occasionner une mortalité élevée, à condition de ne pas commencer l'exploitation trop tôt dans la saison de croissance. Ceci ne signifie pas que la production restera au même niveau. Face à une telle intensité d'utilisation, il faut s'attendre à une diminution annuelle de la production de 10-30 %, sauf compensation des pertes en éléments nutritifs, notamment en phosphore. L'apport d'éléments nutritifs dans des conditions naturelles est tellement limité, qu'il ne semble pas souhaitable d'exploiter plus de 15 % de la production annuelle moyenne.

Un autre facteur limitatif est constitué par l'accessibilité du fourrage ligneux. Celui-ci dépend de l'espèce animale, de la forme de croissance et de la hauteur des espèces ligneuses. Ces dernières caractéristiques sont déterminées par la région et par l'espèce. Pour les troupeaux constitués de petit bétail, de bovins et de dromadaires, il est admis que, dans le Sahel, 25 % des feuilles et des tiges sont accessibles, contre 15 % dans la savane. Compte tenu des fruits, qui gardent une certaine valeur une fois tombés à terre, ainsi que de quelques pertes, la part de fourrage d'espèces ligneuses disponible en moyenne sur une année est de 35 et 25 % dans le Sahel et la savane (I.2.5). L'accessibilité augmente bien entendu lorsque la coupe rend ce fourrage d'espèces ligneuses plus accessible, mais dans ce cas, la durabilité de la production n'est certes pas garantie.

La phénologie des espèces ligneuses joue également un rôle important pour déterminer la période de l'année pendant laquelle le fourrage des espèces ligneuses est disponible. En effet, pour l'élevage, le fourrage des espèces ligneuses a son importance notamment pendant la saison sèche. Cependant toute la quantité produite pendant l'année n'est pas disponible à ce moment. Au début de la saison sèche, ce sont les feuilles qui sont le plus disponibles, mais la plupart des jeunes pousses se sont alors déjà lignifiées. A ce moment de l'année, la disponibilité potentielle de fourrage des espèces ligneuses est estimée à 67 % de la production annuelle totale. Pour une accessibilité de 25 et 15 % dans le Sahel et la savane, sa disponibilité est alors de 0,67 × 25 % et 0,67 × 15 % respectivement dans le Sahel et dans la savane. Ultérieurement, les fruits et feuilles tombés deviennent accessibles, mais tout comme pour la strate herbacée, des pertes interviennent. A la fin de la saison sèche, de nouvelles feuilles se reforment déjà ; cette production est estimée à 10 à 15 % de la production annuelle de feuilles. A ce moment de l'année, les feuilles tombées peuvent être négligées, compte tenu de la forte diminution de la qualité. En l'absence de données obtenues sur le terrain, ce manuel se base pour l'estimation de fourrage des espèces ligneuses en saison sèche, sur une disponibilité de 30 % de la production annuelle. Ce pourcentage n'est valable qu'à condition que le pâturage aérien soit exploité de manière équilibrée tout au long de la saison sèche.

Partie II.3
Partie II.4 et II.5

Partie III
Partie IV, bibliographie et annexes

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens (Partie II.3)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

Table des matières
Partie I
Partie II.1 et II.2

II.3. Evaluation semi-détaillée

II.3.1. Introduction

Ce chapitre traitera en détail de la méthode d'évaluation. Seuls les éléments spécifiques à cette méthode seront analysés de manière approfondie : ils concernent la cartographie (II.3.2 et II.3.7), le travail sur le terrain (II.3.3 et II.3.5) et l'interprétation des données obtenues sur le terrain (II.3.6). L'évaluation théorique de la production et du taux d'azote de la strate herbacée sera traitée une fois encore (II.3.4) : un certain nombre d'éléments seront développés pour permettre des estimations plus précises.

Les cartes distinguent différentes unités de paysage pour tenter de mettre en évidence les différences de disponibilités en éléments nutritifs et/ou en eau, de manière à permettre leur estimation. Une attention particulière est portée à l'utilisation des photos aériennes.

Outre les vérifications habituelles portant sur la carte provisoire des paysages, le travail sur le terrain porte notamment sur la vérification de l'estimation de la disponibilité en éléments nutritifs et en eau. Cette vérification s'effectue en mesurant la production de la biomasse et de son taux d'azote et de phosphore, par rapport à un certain nombre de facteurs de l'environnement. Cette mesure est prise de façon à ce que les observations d'une année quelconque puissent être extrapolées pour une année sèche et pour une année moyenne.

La méthode idéale pour réaliser une telle évaluation semi-détaillée est décrite chronologiquement dans le schéma II.1;. La subdivision de ce chapitre respecte, dans la mesure du possible, cet ordre chronologique. La répertorisation des données existantes constitue cependant une exception. Les données nécessaires à certaines phases de la procédure et pouvant être recueillies à partir de documents existants, seront traitées au fur et à mesure de l'apparition de ces phases. L'importance accordée à ces documents permet d'une part de définir les éléments devant être recherchés et d'autre part de justifier l'exemple placé au centre de ce chapitre.

Schéma II.1
Représentation schématique de l'évaluation semi-détaillée.

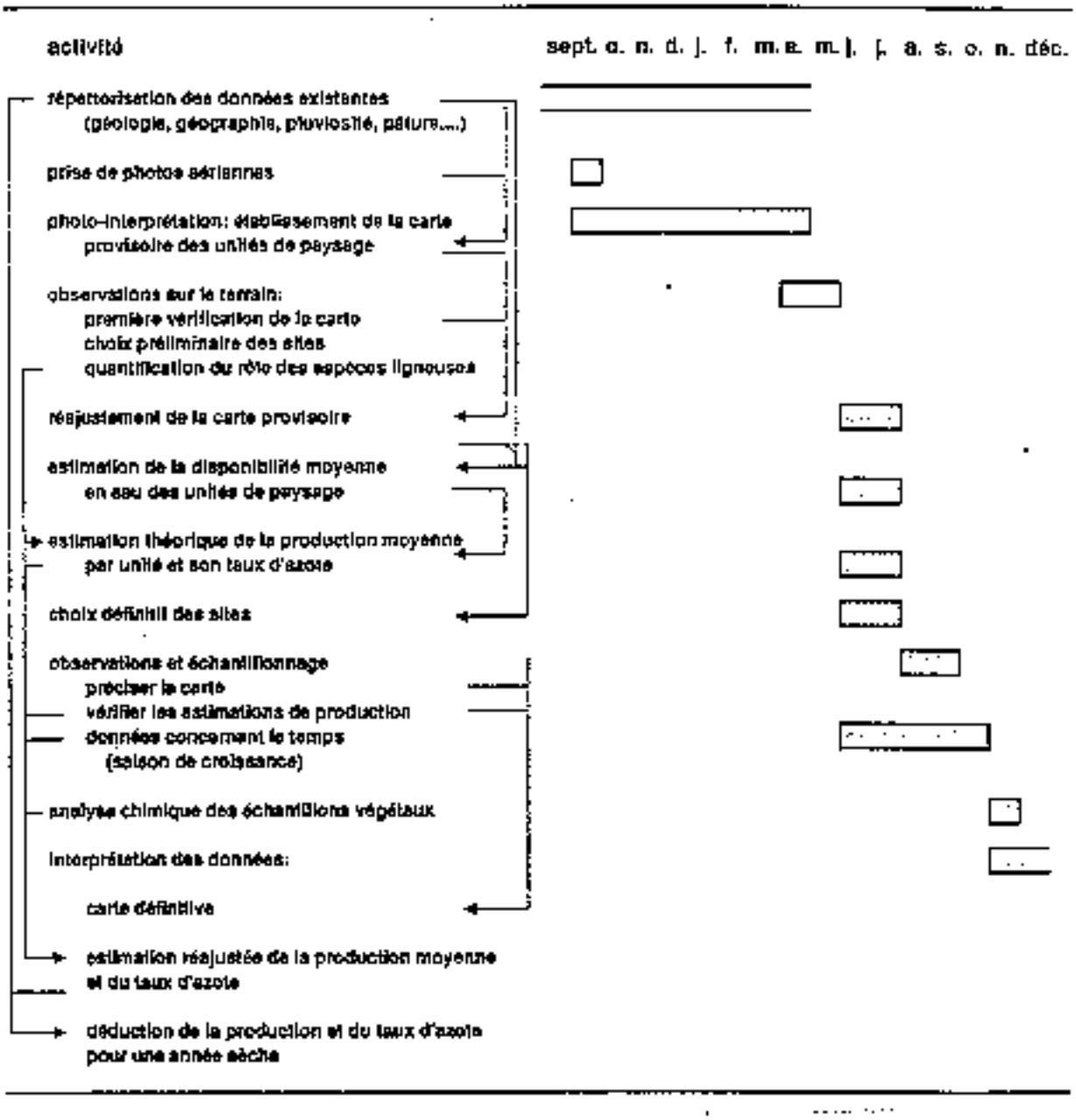


Schéma II.1
Représentation schématique de l'évaluation semi-détaillée.

A titre d'exemple, l'évaluation et l'établissement de la carte ont porté sur un trajet dans le centre du Sahel malien (voir annexe). Le trajet de 340 km de long et de 12 km de large, a été choisi de manière à présenter un maximum de variations :
- sables éoliens, paysages détritiques, plaines alluviales dont certaines sont inondées chaque année ;
- pluviosité diminuant d'une moyenne de 600 mm/an dans le sud, jusqu'à presque 250 mm/an dans le nord ;
- pâturages exploités par l'élevage nomade et par l'élevage (semi-)sédentaire ;
- présence d'agriculture pluviale et d'agriculture irriguée.

II.3.2. Carte provisoire d'unités de paysage

II.3.2.1. Cartographie

Type de carte

La carte constitue un outil et un produit fini de la répertorisation et de l'évaluation des pâturages. Dans le cas de la méthode présentée, la carte des paysages est considérée comme la plus adéquate, le paysage étant vu comme un ensemble « climat, sol, végétation et charge d'exploitation ». Lors de la caractérisation et la classification des unités de paysage à partir de photos aériennes, les différences de disponibilité en eau et en éléments nutritifs pour la croissance de la végétation, servent autant que possible de critère. En effet, ce sont elles qui déterminent la quantité et la qualité de la production primaire et par conséquent la capacité de charge des pâturages.

Dans la méthode d'évaluation courante des pâturages naturels (FAO, 1987) la représentation cartographique de la végétation joue un rôle important (Zonneveld et al., 1979). La composition et la structure de la végétation permettent de distinguer des types de végétation au moyen de l'analyse factorielle des correspondances (Roux & Roux, 1967 ; Djitèye, 1988). Les facteurs de l'environnement peuvent servir de critères pour la classification chorologique de ces types de végétation. La légende de la carte s'établit à partir de la corrélation entre les unités d'interprétation de la photo aérienne (concept unités de légende = paysages) et les unités de classification (types de végétation). Pour une caractérisation et un classement plus poussés des unités de paysage différenciées en premier ressort à partir de la végétation, on a recours à l'histoire géologique, aux caractéristiques du sol et du climat, et à l'ampleur de l'influence humaine et à celle du règne animal. Les observations et les mesures sur la végétation constituent donc un critère important pour la définition des unités de paysage, mais elles sont également utilisées pour évaluer la production et la qualité des fourrage, les risques de dégradation, etc.

Dans les pays sahéliens, il n'est pas possible de mettre l'accent sur la végétation en tant que critère central de classification, compte tenu de la dominance des espèces annuelles et de la forte dynamique des végétations (I.1). Dans la méthode développée et décrite, le type de paysage et le substrat évincent les types de végétation de la place centrale qu'elles occupent dans les critères de classification Zonneveld, 1989a et b). Par contre, la valeur indicative des végétations est reconnue : là où cela est possible elle est utilisée pour la reconnaissance et la caractérisation du substrat. Cependant, la structure prédomine sur la composition de la végétation. La dernière ne constitue un facteur important, que lorsqu'il s'agit d'espèces pluri-annuelles, surtout d'espèces ligneuses, individuellement ou en groupes.

Les mesures de la biomasse et les déterminations des taux d'azote et de phosphore ne constituent pas une base pour l'estimation de la capacité de charge. Elles servent à vérifier la disponibilité en éléments nutritifs estimée par la théorie, et à rechercher les causes d'éventuelles discordances entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques.

Pour établir la carte provisoire, l'utilisation et l'interprétation de photos aériennes sont essentielles. L'identification et la classification des unités de carte, sur la base de la disponibilité en eau, occupe une place essentielle. Les photos aériennes ne permettent pratiquement pas de déduire les différences de fertilité du sol, car, dans les pays sahéliens, ce sont les différences de disponibilité en eau et l'intensité d'exploitation qui marquent réellement le paysage. La prise en compte de l'évolution géologique lors de la classification du paysage permet d'augmenter les chances de découverte de différences de fertilité du sol. La classification des paysages devient ainsi une classification géomorphologique.

Classification

La classification provisoire des paysages est effectuée sur la base de caractéristiques photographiques visibles, combinées avec des informations géologiques de base et des cartes topographiques. Dans le cas de cet exemple, les informations géologiques proviennent en majeure partie de Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 52-71). Les informations pédologiques (descriptions des profils, texture, disponibilité en éléments nutritifs et caractéristiques jouant un rôle dans la disponibilité en eau) proviennent de cette même source. Par ailleurs, le précis physico-géographique détaillé de Barth (1977) a été utilisé. Les informations géologiques détaillées ont été recueillies dans les études de Palausi (1959) et de Barrère & Slansky (1965). Les informations topographiques proviennent des cartes de l'IGN citées ci après (échelle 1 : 200.000 ; 1960) : NE-30-I (Hassi-Touil) ; ND-30-XIX (Nampala) ; ND-30-XX (San) ; ND-29-XVIII (Sokolo) ; ND-30-XIII (Niono).

La différenciation entre les unités de paysage et leur description est basée sur une série d'étapes hiérarchiques. Les quatre premières concernent les étapes d'une classification chorologique vers une échelle de plus en plus grande. La classification au niveau le plus élevé (i) n'est pas ou à peine possible à partir de photos aériennes, par contre cette méthode est appliquée de manière importante pour le second niveau (ii). Aux niveaux (iii) et (iv), les classifications reposent entièrement sur les caractéristiques visibles des photos. Ensuite viennent les niveaux (v) et (vi) comportant une caractérisation des différences entre les unités de paysages, obtenue principalement par déduction (voir également légende de la carte en annexe) :

(i) Unité géologique
Il s'agit là de la classification au niveau chorologique le plus élevé. Les frontières sont déterminées par différents aspects ou procédés géologiques.

L'exemple distingue trois unités principales :
- paysages détritiques avec des sols qui se sont développés sur de la latérite et du grès, formés à partir de dépôts sablo-argileux du tertiaire, le Terminal Continental ; ces paysages apparaissent dans le nord et le centre du trajet ;
- dépôts éoliens de sable à la fin du Pléistocène, le Würm (il y a 12.000-15.000 ans), déformé pendant le Subboréal (il y a 4.000-7.000 ans) ; présent dans le trajet en alternance avec l'unité précédente ;
- les dépôts alluviaux du début du Holocène (il y a 7.000-10.000 ans) et du Subatlanticum (de 4.000 ans à maintenant), en partie recouverts et en partie déformés pendant le Subboréal ; présent dans le sud du

trajet.

(ii) Unité géomorphologique

La classification secondaire au niveau chorologique conduit à des unités géomorphologiques ; elle tient compte de la genèse. Les sources mentionnées ci-dessus sont utilisées partiellement, et complétées par les photos aériennes. Les caractéristiques photographiques visibles telles que la couleur, le relief, l'altitude (relative), les profils de végétation et de drainage permettent de distinguer les unités géomorphologiques : dunes, étendues de sable, crêtes rocheuses, plateaux latéritiques, bassins de rivière et autres. Cependant sans informations géologiques de base, il n'est souvent pas possible de distinguer, par exemple, d'anciens dépôts dunaires éoliens de dunes plus récentes, formées par des sables alluviaux entraînés par le vent. Dans l'exemple en question, ce sont surtout les dunes dans la partie limitrophe du delta « mort » du Niger (plaine fossile alluviale) qui posent des problèmes : s'agit-il là de dépôts éoliens ou de sables alluviaux entraînés par le vent ? C'est pourquoi certaines unités ont été qualifiées de zones de transition (voir également II.3.2.3).

A ce niveau de l'exemple, les dépôts alluviaux ne sont pas subdivisés ; tous les sables blanc-jaune sont considérés comme appartenant à une seule unité géomorphologique. Le paysage détritique se subdivise cependant en différentes unités : crêtes rocheuses (latérite ou grès), plateaux latéritiques (complexes de différentes altitudes) et sables rouges. Quant aux plaines alluviales, elles sont distinguées à partir de leur époque d'inondation : dans un lointain passé (« delta intérieur mort ») ou encore actuellement (« delta intérieur vif »).

(iii) Forme

Il s'agit d'une subdivision des unités géomorphologiques sur la base d'au moins une caractéristique précise. La plupart du temps, il s'agit de l'altitude et/ou du relief, tous deux éléments importants pour la disponibilité en eau. D'une manière générale, ces éléments se manifestent par le type et l'abondance de la végétation (profil de végétation). Les différences de sol pouvant être observées visuellement jouent également un rôle. Les indications d'altitude sont relatives ; généralement les différences d'altitude sont très faibles, aussi bien sur le trajet choisi qu'ailleurs. Dans de grandes parties des pays sahéliens, le paysage est plat, avec des petites différences d'altitude qui sont cependant d'importance pour le régime des eaux. Lorsque ces différences ne peuvent être mesurées sur les photos ou à peine, ce sont les courbes de niveau des cartes topographiques qui sont utilisées. Lorsque dans la description de l'exemple, il est question de relief, il s'agit du relief à l'intérieur de l'unité. Les déclivités qui apparaissent clairement sur les photos, mais toujours inférieures à 8%, ont donné lieu à la différenciation de l'aspect « ondulé » (classification FAO). Ainsi est apparue une subdivision principale concernant l'aspect forme du terrain, « ondulé » , « plat » et « dépression ». Dans les subdivisions « ondulé » et « plat » une nouvelle classification est possible selon l'altitude relative : élevé, intermédiaire et basse. Les «dépressions » avec et sans fossés de drainage ont fait l'objet d'une distinction, et le fait d'être soumis ou non aux inondations représente également un critère de classification. Finalement, les sables «ondulés » peuvent apparaître dans chacune des unités géomorphologiques sous différentes formes de dunes. Il est question, dans certains cas, de complexes, parce que les critères de classification cités n'ont pas de caractère absolu ou

encore parce que les unités de forme sont trop petites.

(iv) Profil de végétation
Il s'agit là d'une autre caractéristique visible ayant contribué à distinguer les formes de paysage (iii) ou même les unités géomorphologiques (ii) (notamment « les sables »), et permettant même parfois de les subdiviser. Un code est conseillé pour permettre une description avec un maximum d'objectivité, pour des aspects comme :
- le taux de recouvrement par les arbres et arbustes (0-100 %) ; les estimations en question sont loin d'être fiables sur la base de photos aériennes utilisées à l'échelle de 1 : 50.000 ;
- l'homogénéité de la végétation, et les dimensions (en fonction de l'échelle) des éléments de la végétation repérables sur les photos aériennes dans le cas de végétations hétérogènes (par exemple : pas d'éléments individuels à distinguer ; éléments très fins, fins et grossiers) ;
- l'orientation des éléments de végétation photographiques (par exemple : au hasard, parallèle, courbée, et le long des fossés de drainage.

Des profils de végétation, se ressemblant fortement à première vue, peuvent présenter, par suite de différences de pluviosité moyenne annuelle, de profondeur de la nappe phréatique (proximité de plaines d'inondation, zones irriguées) et/ou d'intensité d'exploitation, de telles différences du point de vue du recouvrement et des dimensions des éléments de végétation photographiques et de leur distance entre eux, à cause de la densité des arbres, qu'il y a lieu de procéder à une nouvelle subdivision des unités de paysage (photo II.4a, b et c). Le travail sur le terrain permet notamment d'apporter des réponses quant aux véritables raisons de cette diversité.

(v) Substrat
Il s'agit de la texture du ou des sols dominants dans une unité de paysage, avec estimation des fractions de la superficie totale d'une unité se composant de dépressions, de déclivités (si la pente $\geq$ 1 %) et de plaines (subdivisé éventuellement en plaines et en plateaux). Cette caractérisation est déduite des données sur lesquelles sont basées les différenciations précitées, tout en tenant compte d'un nombre d'hypothèses émises lors de l'interprétation des photos aériennes (II.3.2.2) et d'informations fournies par les cartes des sols. Cette caractérisation permet une évaluation quantitative de la redistribution de l'eau. Sans les informations fournies par le travail sur le terrain (II.3.3 et II.3.5), il s'agit là d'une affaire hasardeuse. Le travail sur le terrain consacre une part importante à l'observations de la structure de la végétation. Ce travail doit révéler le détail de la structure de végétation apparaissant sur les photos aériennes (iv). La richesse des formes de croissance et l'homogénéité de leur répartition constituent les caractéristiques importantes des unités. Une grande richesse des formes de croissance et une répartition hétérogène sont la preuve d'une redistribution locale importante de l'eau de pluie.

(vi) Composition floristique
Tout comme pour le substrat, il s'agit là d'une déduction des données utilisées précédemment (géomorphologie, topographie et information fournies par les photos aériennes), qui doivent être vérifiées par le travail sur le terrain. Les différences importantes dues à la pluviosité annuelle moyenne et/ou à l'utilisation de la terre, peuvent entraîner une dernière subdivision. Dans cet exemple, il est peu

probable qu'une unité de paysage présente dans le nord du trajet la même végétation que dans le sud, bien que la géomorphologie, la forme et la végétation puissent être identiques. Les photos aériennes ne permettent pas d'en déterminer les limites, mais parfois la densité des arbres peut servir de critère provisoire.

Chacune des étapes de différenciation ci-dessus n'entraîne pas nécessairement une nouvelle sub-division du paysage ; elles peuvent simplement servir à la caractérisation. Ce manuel utilise au maximum une subdivision à trois niveaux : géologique, géomorphologique et « physiographique ». La carte en annexe fait apparaître que les unités physiographiques ou unités de paysages sont caractérisées par leur forme, leur substrat et leur végétation.

II.3.2.2. Photo-interprétation

Photos aériennes

Les diapositives utilisées pour l'exemple sont des diapositives « fausses couleurs » (échelle 1 : 50.000) réalisées à la fin du mois d'octobre 1977.

Par la suite, quelques doutes ont été émis quant à la justesse de ce choix, compte tenu de la difficulté d'interpréter les différences de couleurs. Pour le nord du Sahel notamment, la photographie en couleurs naturelles aurait vraisemblablement été plus adaptée. Les diapositives auraient dû permettre de détecter les profils de végétation ainsi que les différences de couleur du sol ; un point important était entre autres la différence entre les sables rouges et sables jaunes. Les interférences entre les couleurs du sol et celles de la végétation n'ont pas facilité les choses. Plusieurs raisons ont pu entrer en ligne de compte :
- Le vol a eu lieu plus tard que prévu (schéma II.1). La strate herbacée était déjà pratiquement morte partout ; il n'a donc pas été possible de profiter réellement de la réflection des infra-rouges.
- L'année 1977 était une année très sèche, avec approximativement la moitié de la pluviosité normale. Sur de grandes parties du trajet, seules quelques centaines de kg de matière sèche par hectare ont pu être produits. La contribution de la végétation à la réflection était très changeante à cause de différences dans la couverture végétale.

Hypothèses

La disponibilité en eau est déterminée en premier ressort par le climat ; les informations à ce sujet ne peuvent être déduites directement des photos aériennes. Par contre, les photos aériennes contiennent de nombreuses informations sur la mesure selon laquelle le substrat modifie et influence la disponibilité moyenne en eau (déterminée par la pluviosité et l'évaporation).

Les différences de disponibilité en eau entre différentes unités de paysage résultent de :
- l'importance de la redistribution par ruissellement ou par concentration des écoulements en surface. Cette redistribution est déterminée par la texture du sol, la déclivité et la rugosité de la surface, et la position des unités les unes par rapport aux autres ;

- la capacité de stockage du sol, déterminée par la profondeur et la texture du sol.

Ces informations peuvent être obtenues à partir des photos aériennes en tenant compte des règles suivantes :
- la redistribution est d'autant plus forte que les profils de végétation sont plus prononcés et que les traces de ruissellement sont plus nombreuses (cours d'eau temporaires, rivières, mares et lacs) ;
- une classification selon l'altitude relative correspond souvent à une classification selon la texture : plus l'unité est basse, plus la texture est fine.
- les déclivités qui occasionnent le ruissellement sur des sols sablo-limoneux ou sur des sols à texture encore plus fine (1 à 2 % sont déjà suffisants), souvent n'apparaissent pas sur les photos aériennes. Les déclivités visibles, sans ou avec légères indications de redistribution, indiquent qu'il s'agit d'un sol sablonneux ; cependant, des déclivités de 5 à 10 % sont suffisantes pour provoquer un ruissellement même sur le sable ;
- pour les substrats sablonneux, il est souvent exact que l'importance du relief est directement proportionnelle à une texture plus grossière ;
- les dépôts éoliens sont principalement des sols de texture sablonneuse, souvent très profonds ;
- les paysages détritiques sont caractérisés par des sols surtout limoneux ; il est souvent possible de départager les plateaux des vallées, les sols des plateaux et les sols des zones de transition vers les vallées étant peu profonds à cause de grès ou de latérite présent en surface ;
- les dépôts alluviaux présentent surtout des sols limoneux à argileux, qui sont relativement profonds.

Approche

Ne seront traitées ici ni la technique de la photo-interprétation ni celle de la représentation cartographique, pour lesquelles il faut consulter des ouvrages spécialisés. Certains de ces ouvrages traitent spécifiquement des pays sahéliens (par exemple Heetman et al., 1987). Ce manuel ne fait qu'émettre quelques suggestions pour mettre en pratique ce qui précède.

Dans un premier temps, les unités distinguées par les méthodes standards de photo-interprétation sont codées provisoirement. Chacune des unités est homogène en couleur, en relief, et en profils de végétation ou forme un complexe qui, compte tenu de l'échelle, ne peut être redivisé de manière utile. La classification principale est effectuée sur la base des données des ouvrages spécialisés (II.3.2.1 ; i et ii). Une classification plus poussée doit s'effectuer notamment sur le critère de la redistribution de l'eau de pluie. Pour cela, l'échelle (distances de déplacement) et l'intensité devront être pris en compte.

Une première différenciation est faite entre les unités avec et sans indications de redistribution. Une nouvelle classification est possible sur la base du relief, des profils de drainage, des profils de végétation et du degré de recouvrement. Pour la subdivision sur la base de la redistribution d'eau aux niveaux chorologiques supérieurs (unité géologique, unité géomorphologique et forme de paysage), ce sont le relief et les profils de drainage qui importent. Les lignes altimétriques sur les cartes topographiques constituent une aide appréciable (voir carte en annexe : « Géographie physique de la zone d'étude »). Pour les subdivisions qui suivent, à savoir la classification finale en unités physiographiques, les critères

sont le relief et les profils de végétation. Il n'y a pas de différence de principe avec les unités globales, mais la redistribution de l'eau s'effectue à l'intérieur de l'unité et les profils de drainage peuvent uniquement être déduits à partir de différences dans la présence et la structure des végétations.

Pour pouvoir quantifier la redistribution, il est important de déterminer à l'intérieur des unités, la part relative de vallées, de déclivités et de plaines, pour autant que cela ressorte des photos aériennes.

Exemples

Ce qui précède sera illustré à l'aide d'exemples avec et sans redistribution de l'eau. Les codes sur certaines photos indiquent déjà en avant, vers la carte en annexe. Le titre de chaque photo concernée est suivie des indications, permettant de localiser les illustrations sur la carte, avec l'aide de la petite carte géographique : le numéro de la partie de carte est donné, suivi de la pluviosité moyenne.

Pas de redistribution de l'eau de pluie
Cette situation se présente dans les unités avec des sols à grande capacité d'infiltration, à savoir les sols sablonneux : plus la texture est grossière, plus les déclivités peuvent être fortes sans occasionner de ruissellement. Dans les unités avec des sols limoneux-sablonneux ou des sols encore plus lourds (capacité d'infiltration plus faible), il peut se produire également une situation sans redistribution, mais alors le terrain doit être très plat ; sur de tels sols, 1 à 2 % de déclivité sont suffisants pour occasionner un ruissellement.

Le trajet choisi ne couvre pas de tels exemples. Le premier cas est représenté dans la photo II.1. Il s'agit d'un paysage de dunes, pratiquement sans arbres ou arbustes ; les éléments de végétation ne se détachent pas individuellement. La végétation homogène et l'absence d'arbres et d'arbustes indiquent une absence totale de redistribution d'eau de pluie à l'intérieur de cette unité, malgré le paysage ondulé (II.3.2.1 ; iii). C'est pourquoi on suppose que les sols sont principalement de texture sablonneuse avec une capacité d'infiltration (très) élevée.

Redistribution à l'intérieur des unités
Le paysage de dunes de la photo II.2 est l'exemple typique de la redistribution de l'eau de pluie à l'intérieur d'une unité. Cette unité est composée de dunes et de vallées. Le recouvrement ligneux des dunes est inférieur à 1 %. Les éléments de végétation sont très fins sur la photo et leur dispersion est au hasard. Le recouvrement ligneux des vallées est de 10 à 20 %. Les éléments de végétation y sont grossiers et leur distribution est parallèle. Ici également il s'agit de paysage ondulé. La différence dans la couverture végétale (les espèces ligneuses notamment sont visibles) mène à la conclusion qu'il est question d'une redistribution de l'eau de pluie, à cause des sols présentant une structure plus lourde que dans l'exemple de la photo II.1. On suppose que la texture est sablo-limoneuse. Si la différence en couverture végétale constitue le critère de subdivision, il apparaît que l'eau ruisselle de 80 % de la superficie de l'unité (les dunes) et se concentre sur 20 % (les vallées). L'échelle utilisée ne permet pas de cartographier séparément les deux éléments.

La photo II.3 illustre un exemple de l'accroissement de la redistribution de l'eau de pluie à l'intérieur des unités. L'unité représentée dans la photo II.3a est caractérisée par un recouvrement variable par des arbres, localement 10 %, atteignant à certains endroits 40 à 50 %, par des éléments de végétation fins à grossiers sur la photo, répartis au hasard. Il est malaisé de distinguer les deux éléments dans l'unité (endroits avec ruissellement et avec concentration des écoulements. Il semble sur la photo depuis le haut à gauche vers le bas à droite, qu'il y a évolution du profil végétal. La vue d'ensemble permet de constater que, dans le bas à droite, il est question d'une transition vers l'unité de la photo II.3b. Les taches plus claires sur la photo indiquent que la couverture de la strate herbacée y est localement plus faible ou absente. Ceci apparaît encore plus clairement dans la photo II.3c, alors que les éléments de végétation photo représentant les endroits avec un recouvrement ligneux élevé grandissent parallèlement à l'éclaircissement. La différence de recouvrement par rapport à la photo II.3b ne devient réellement importante que dans la photo II.3d ; sur de grandes parties de l'unité, la strate herbacée semble inexistante (lors du travail sur le terrain, il est apparu qu'il s'agissait d'un endroit surpâturé à l'intérieur de l'unité de la photo II.3b).

Lorsque les précipitations sont à peu près identiques pour les différentes unités, tel que c'est le cas dans cet exemple, de telles comparaisons permettent de déduire assez aisément le relief et la texture du sol. La couleur sur les photos peut apporter des informations complémentaires sur le type de sol et les informations géologiques contribuent à l'interprétation.

Les unités de la photo II.3 se situent dans le delta mort du Niger (« ensemble fluviatile ») qui, dans le passé, a été quelque peu recouvert par les sables, et où le vent a transformé les dépôts de sable alluviaux en amas de différentes épaisseurs. Selon la photo le relief est très réduit (différences de quelques mètres au plus ; déclivités très faibles). L'unité de la photo II.3a se compose de sable limoneux, mais la redistribution reste assez limitée parce que le terrain est plat. La concentration des écoulements se produit sur 20 % de la surface.

Dans les photos II.3b et c, cette partie s'agrandit : le paysage se compose d'une mosaïque d'ermes et de fourrés. Les ermes de la photo II.3b sont plus sablonneux que les ermes limoneux de la photo II.3c. Les fourrés de la photo II.3c sont plus argileux que ceux de la photo II.3b. La coupe transversale de l'ensemble fluviatile (voir carte en annexe) fournit l'interprétation finale : en passant de la photo II.3a vers b et c l'épaisseur de l'amas de sable sur le sous-sol limoneux-argileux diminue et la texture s'affine.

Pour calculer le bilan hydrique d'une unité (II.3.4), il faut enregistrer l'altitude des unités les unes par rapport aux autres afin de savoir où passent les éventuelles pertes d'eau de l'unité. Il ressort de ce qui précède que l'unité de la photo II.3a est la plus élevée et celle de la photo II.3c la plus basse.

A l'intérieur d'une même unité, il est fréquent de constater que, plus son altitude est basse, plus son sol sera lourd. Ceci ne vaut pas toujours là où les unités sont limitrophes : les sols relativement lourds de l'ensemble détritique (limoneux) se situent généralement à une altitude plus élevée que les sols sablonneux plus légers de l'ensemble éolien voisin (comparer la carte des unités de paysage avec la carte physico-géographique en annexe).

La redistribution à l'intérieur des unités de la photo II.4 se différencie à deux égards de celle des exemples précédents : elle est plus intense mais se présente sur des distances plus courtes. Les unités représentées sont connues sous le nom de « brousse tigrée », dans laquelle on distingue deux éléments principaux : des bandes ou des endroits (presque totalement) dépourvus de végétation et de petits fourrés denses.

L'absence presque totale d'une strate herbacée alors que, selon les photos, les déclivités sont très faibles, indique qu'il s'agit de sols à mauvaise infiltration, à sensibilité à l'encroûtement et/ou de sols très peu profonds ; la texture est très vraisemblablement limono-sablonneuse. La faible profondeur des sols est confirmée par la présence d'affleurements rocheux et d'escarpements (voir flèches). L'hétérogénéité de la végétation indique la présence d'un micro-relief non discernable sur les photos, car les différences d'altitude entre les parties boisées et nues sont très faibles. Ceci signifie également qu'il y a un grand risque pour cette unité de perdre de l'eau compte tenu de la faible capacité de stockage des fourrés (voir plus loin ; photo II.6).

Les différences de profils et d'orientation sont très vraisemblablement le résultat de petites différences dans la texture, la déclivité, le micro-relief et la profondeur du sol. Le profil plus fin de l'unité C24 par rapport à celui de l'unité C22 de la photo II.4a, indique par exemple une redistribution un peu moins intensive dans l'unité C24. Il est vraisemblable que le terrain est ici plus plat et/ou que la texture est un peu plus sablonneuse. Ce dernier élément est confirmé par la couleur sur la photo. Les différences dans la profondeur du sol et la présence de gravier peuvent également jouer un rôle, compte tenu du fait qu'à certains endroits la roche affleure le sol.

Le rapport entre la superficie soumise au ruissellement et celle soumise à la concentration des écoulements va croissant, de la photo II.4a à c. Ceci est en relation directe avec la pluviosité : en moyenne 480 mm, 350 mm et 300 mm par an pour respectivement les zones des photos II.4a, b et c. Diverses « transitions » dans le profil, telles que celles de la photo II.4a vers b et de b vers c, ont été trouvées sur le trajet cartographié. En fonction des extrêmes, il est aisé de conclure à différentes unités ; les transitions progressives rendent cependant toute limitation difficile.

Deux autres exemples de forte redistribution à l'intérieur d'une unité sont présentés dans les photos II.5a et b. La première est également visible en haut sur le côté gauche de la photo II.4b (unité C23). Tout comme dans les unités principales des photos II.4, il y a redistribution à l'intérieur de l'unité, mais sur une distance très courte. L'unité est très plane, mais compte tenu de l'hétérogénéité de la végétation, il doit y avoir un micro-relief fin. En plus de la couleur, ceci indique une plaine limono-sablonneuse, alors que la vue d'ensemble indique que l'unité se situe dans « l'ensemble détritique ».

L'unité de la photo II.5b ressemble à maints égards à la plaine limoneuse avec les dépressions argileuses de la photo II.3c. Les petites taches rondes sans strate herbacée attirent cependant l'attention. Lors du travail sur le terrain, il est apparu qu'il s'agissait là de zones situées autour des termitières, à fort ruissellement.

Les termitières entraînent l'hétérogénéité à l'intérieur d'une unité, ou à l'intérieur d'un élément de l'unité. Les dépressions (limono-)argileuses dans l'exemple sont habituellement relativement homogène. Mais les sols lourds à vitesse d'infiltration très lente occasionnent, lors de petites différences de niveau comme celles occasionnées par les termitières, une forte redistribution, malgré leur faible altitude dans le terrain.

Ces exemples montrent que le critère de végétation homogène n'est pas toujours suffisant pour estimer la texture. Ainsi, une végétation homogène (strate herbacée et espèces ligneuses) peut indiquer des dunes à sable grossier (photo II.1), des plaines sablonneuses et des dépressions argileuses. D'autres critères tels que l'altitude dans le paysage, sont nécessaires pour pouvoir effectuer une différenciation. Les dépressions argileuses peuvent être distinguées dans des zones à forte pluviosité, par le fait qu'elles sont temporairement inondées.

Redistribution entre les unités
Lorsque les seules photos aériennes fournissent trop peu d'informations (différences minimales et/ou distances trop grandes), les unités individuelles peuvent être classifiées selon leur altitude grâce aux profils de drainage et aux courbes de niveau des cartes topographiques. Il est ainsi également possible d'obtenir des informations complémentaires quant aux différences de texture entre les unités.

La redistribution peut avoir lieu entre les unités à tous les niveaux chorologiques. Voici quelques exemples au niveau de l'unité géologique, de l'unité géomorphologique et de la forme du paysage.

La photo II.6 illustre trois exemples de redistribution entre les unités géologiques. Deux concernent l'eau de pluie qui s'écoule de l'ensemble détritique (C) relativement élevé, vers l'ensemble fluviatile (F ; photo II.6a et b), l'autre concerne le ruissellement de l'ensemble détritique vers l'ensemble éolien (E ; photo II.6c).

La photo II.6a montre clairement que les unités de paysage à forte redistribution interne, qui font partie de l'ensemble détritique (de la photo II.4), perdent également de l'eau en faveur des unités avoisinantes : l'eau en provenance de diverses unités se rassemble dans un système de drainage prononcé qui va dans le sens de l'ensemble fluviatile (voir flèche). Il n'y a pratiquement pas de ruissellement en direction de l'ensemble éolien, bien que les photos aériennes attestent que cet ensemble est également situé à plus basse altitude. L'ensemble détritique est donc incliné vers l'ensemble fluviatile.

Compte tenu de la forte densité d'arbres et d'arbustes dans les fossés de drainage, du bon développement homogène de la strate herbacée dans les environs et de l'installation de champs dans « l'embouchure » du système de drainage, il semble que beaucoup d'eau s'infiltre dans et à la proximité des fossés de drainage. La zone basse avec le système de drainage présente évidemment un sol profond relativement sablonneux, ce qui permet de limiter le total des pertes de l'ensemble détritique dans le cas présent.

La situation présentée dans la photo II.6b se situe juste à gauche du centre de la partie 2 de la carte

présentée en annexe. La carte d'ensemble physico-géographique en annexe montre qu'il s'agit de l'ensemble fluviatile de faible altitude qui s'étend entre les ensembles détritiques des parties 1 et 3. Les dépressions apparaissant clairement sur la photo ne semblent pas seulement recevoir de l'eau originaire de l'ensemble fluviatile, mais également de l'eau en provenance d'une autre unité de paysage, acheminée par le fossé de drainage situé dans le coin supérieur gauche. Le travail sur le terrain a confirmé les hypothèses résultant de la photo aérienne, à savoir que les canaux de drainage sont recouverts de sable, alors que les informations hydrologiques attestent que le canal de drainage en question contient rarement de l'eau courante, et que dans la dépression une contribution importante à l'eau concentrée ne peut donc intervenir par ce biais.

La photo II.6c représente une situation où l'eau qui ruisselle à partir de l'ensemble détritique est presque entièrement absorbée dans l'ensemble éolien sans s'écouler au-delà. Dans le bas à droite de la photo, se trouve une crête latéritique presque nue avec, à sa gauche, une déclivité assez forte. Le bon développement de la végétation avec un nombre relativement important d'arbres et d'arbustes à la base de cette déclivité, révèle la présence d'eau supplémentaire. La plaine à gauche de la photo, dispose de beaucoup moins de végétation qui, pourtant, doit être très homogène compte tenu du manque de structure de la photo à cet endroit. Ceci indique une infiltration rapide et homogène et des sols profonds sablonneux avec peu de redistribution. Le bon développement de la végétation à la limite des deux unités ne peut donc être que le résultat de la présence d'eau en provenance de l'ensemble détritique.

La photo II.7 fournit encore deux illustrations de l'hypothèse selon laquelle les profils de drainage fournissent des informations sur la texture. La photo II.7a concerne une vallée discernable aussi bien dans l'ensemble détritique que dans l'ensemble éolien et qui pente de l'ensemble détritique vers l'ensemble éolien. Dans la première unité de paysage, ce niveau présente une végétation dense de broussailles avec des bords complètement nus (indiquant de fortes déclivités et un sol limoneux). Dans la seconde unité, le niveau ne diffère pas beaucoup des alentours et les bords présentent une végétation convenablement développée (indiquant une bonne infiltration d'eau et des sols sablonneux).

La situation illustrée dans la photo II.7b représente un agrandissement de la partie à droite du centre de la photo II.6a. Sur la crête la plus élevée d'un ensemble détritique, se situent des zones à affleurements ronds et rocheux, à végétation relativement homogène et bien développée. Cette image est totalement différente de celle en bas à droite de la photo II.6c, bien qu'elle concerne également le sommet de l'ensemble détritique : à cet endroit le développement de la végétation dans les zones autour de la crête latéritique nue est négligeable et l'eau de ruissellement disparaît dans la plaine sablonneuse située plus bas. Le travail sur le terrain a fait apparaître qu'il s'agissait là d'un dépôt en forme de collier de sols sablonneux à forte infiltration, lesquels ont été déposés sur le substrat principalement limoneux par suite de grès affleurants.

Dans les exemples précédents il n'est pas question de redistribution isolée au niveau du type de paysage. Les pages suivantes ne comporteront pas d'exemples types de redistribution au niveau de la forme de paysage. La photo II.8a montre une situation qui s'en rapproche le plus. L'eau d'une plaine fluviatile (F) se concentre dans les parties les plus basses, à l'intérieur desquelles il s'effectue une graduation selon les

altitudes. Dans les commentaires de la photo II.6b, sur laquelle on reconnaît en haut à droite l'image de la photo II.8a, il avait déjà été mentionné que, dans les années extrêmement humides, l'eau peut arriver dans la plaine à partir de la même unité ou même à partir d'une autre unité.

La photo II.8b représente une forme plus prononcée de la photo II.8a. Une plus grande quantité d'eau semble se concentrer dans les dépressions ; ceci est dû à un rapport plus important entre la surface de ruissellement et la surface de concentration des écoulements, ou bien à une concentration des eaux qui afflue à partir d'autres dépressions. Ceci peut venir aussi bien de la plaine elle-même que du delta vif. L'emplacement de la photo II.8b se situe en effet sur la partie 2 du trajet, entre l'emplacement de la photo II.8a et le delta vif situé plus bas (G11 sur la carte définitive ; voir annexe). A partir de la comparaison entre les recouvrements ligneux dans les dépressions des photos II.8a et b, et leurs environs et de celles dans les dépressions de G11, on conclut que la région représentée dans la photo II.8b doit faire partie du delta mort. Dans et autour de G11, la nappe phréatique est vraisemblablement peu profonde avec de l'eau de surface stagnant longuement dans les parties les plus basses. Ceci entraîne un recouvrement ligneux relativement dense, à l'exception des parties basses où le recouvrement est faible. Dans le delta mort, c'est le contraire qui se produit dans cette zone de pluviosité : recouvrement ligneux dense dans les parties basses et plus clairsemé dans les parties plus hautes.

Puisque les dépressions des photos II.8a et b concernent les parties les plus basses d'une ancienne plaine d'inondation, on conclut qu'il s'agit d'une texture argileuse.

Le lieu représenté dans la photo II.8c ressemble, du point de vue du profil de drainage, beaucoup à celui des deux photos précédentes. Il appartient également à la plaine du delta mort, mais est situé plus vers le sud-ouest (100 mm/an de pluie en plus), juste en-dessous du milieu de la partie 3 du trajet (carte en annexe). Les différences apparaissent tout aussi clairement que les similitudes : une couverture dense avec des arbres et arbustes sur les plaines relativement élevées, et des bas-fonds nus avec de l'eau de surface. Les plaines sont très hétérogènes, et il semble donc que la redistribution locale de l'eau s'effectue plutôt à l'intérieur des unités, qu'entre les unités.

Sur la base d'informations géomorphologiques et topographiques la situation semble aisément interprétable : le chenal principal est une rivière fossile ; il accueille (après la construction du barrage du Niger près de Markala et l'installation de systèmes d'irrigation) les surplus d'eau par l'intermédiaire d'une écluse de régularisation près de Diabaly (voir carte d'ensemble en annexe). A grande distance, il est donc bel et bien question ici de l'influence du delta vif. Sans recherches plus poussées, il n'est pas possible de déterminer si l'accroissement des espèces ligneuses dans les éléments les plus élevés du paysage, en comparaison avec la photo II.8b, est lié à cette influence (niveau élevé de la nappe phréatique comme dans G11), ou à la pluviosité accrue.

La forte hétérogénéité du paysage à proximité d'une ancienne rivière laisse supposer la présence de levées alluviales ; en plus ou à la place d'argile, il pourrait y avoir du limon sablonneux ou du sable limoneux.

Ce dernier exemple illustre donc la redistribution à l'intérieur d'une unité ainsi que la redistribution inter-unités au niveau de l'unité géomorphologique. Il est clair que la redistribution de l'eau de pluie à l'intérieur des unités doit être déduite, notamment à partir du taux d'hétérogénéité de la couverture végétale, et que la redistribution entre les unités doit être déduite à partir des profils de drainage. Mais lors de redistribution entre les unités au niveau de la forme, les deux critères entrent en ligne de compte. Les plaines et les dépressions dans les photos II.8a et b ont été cartographiées séparément plus pour une question d'échelle de principe : il s'agit donc d'une redistribution entre les unités, alors que les dunes et les vallées interdunaires de la photo II.2 ont été cartographiées comme une unité avec une redistribution interne.

Un certain arbitraire est inévitable, sans pour autant que la possibilité de quantifier la redistribution de l'eau ne s'amenuise. Dans l'exemple des photos II.8a et b, il sera possible de calculer les quantités d'eau redistribuées par unité de surface, à l'aide du rapport entre les surfaces des plaines et les surfaces des dépressions, et à l'aide de l'estimation du coefficient de ruissellement des plaines, tout comme pour les dunes et les vallées de la photo II.2. Lors de déplacements d'eau sur de grandes distances (au niveau des unités géologiques ou géomorphologiques), ceci devient difficile sinon impossible sans les données de mesure de ces déplacements (II.3.4).

II.3.2.3. Problèmes

Il n'est pas possible dans le cadre de ce manuel, de passer en revue tous les problèmes qui se posent lors de l'établissement d'une carte (provisoire). Seuls quelques problèmes liés à la méthode utilisée seront abordés. Pour résoudre ces problèmes et ceux non abordés, il faut rappeler la directive générale : la classification doit être faite selon les différences de disponibilité en eau et/ou en éléments nutritifs.

C'est pourquoi, il est préférable de ne pas indiquer a priori les paysages fortement antropogènes comme des unités séparées, mais de les faire figurer en superposition hachurée, ou dans le cas de l'exemple (voir annexe). Bien que les influences antropogènes (agriculture, pâturages, etc.) puissent modifier le bilan hydrique et/ou le bilan des éléments nutritifs d'une unité, il est supposé que ce processus est réversible. Puisqu'il faut déterminer la potentialité d'une unité, c'est le bilan hydrique et/ou le bilan des éléments nutritifs de l'unité d'origine qui importe.

A ce moment, le problème qui se pose lors de l'interprétation de la photo aérienne est qu'il faut voir au-delà des champs et des dégradations, pour retrouver le paysage d'origine. Les éléments qui doivent surtout retenir l'attention sont le substrat, le relief et l'altitude relative des diverses unités de paysage.

L'utilisation des terres est fortement liée à leurs qualités, surtout dans les pays à faible degré de mécanisation et où l'utilisation d'engrais chimiques est rare. C'est pourquoi les limites de l'utilisation des terres correspondent souvent à la classification des paysages (photo II.9). Ceci est particulièrement valable pour l'agriculture pluviale. Néanmoins, il est utile de cartographier les champs en superposition des paysages, car ces champs ne sont pas encore permanents, et souvent les unités ne sont exploitées que partiellement. Pour l'évaluation des pâturages, la partie d'une unité qui a été exploitée mais qui se trouve

en jachère a son importance, car la contribution à la disponibilité des fourrages sera différente de celle des parties avec des prairies naturelles. Cependant la distinction entre les terres nouvellement en jachère et les champs est difficile, et les anciennes jachères ressemblent aux végétations naturelles (photo II.9a). Néanmoins, il importe de les distinguer, car la production des (jeunes) jachères sera inférieure à celle des pâturages environnants à cause de leur plus faible disponibilité en éléments nutritifs. Le travail sur le terrain et/ou la télédétection (quelques prises de vues pendant la saison) sont donc nécessaires, alors que des statistiques agricoles fiables permettent de déterminer la période de jachère.

Dans le cadre de la répertorisation des pâturages, les champs irrigués ont été cartographiés indépendamment du paysage d'origine (photo II.9b ; carte en annexe, G20), compte tenu de leur caractère permanent.

La dégradation des pâturages est moins influencée par les limites naturelles des paysages que l'agriculture pluviale (photo II.9b). Dans le cadre présent, la « dégradation »est le processus qui modifie le sol et la végétation de telle façon que la production annuelle de la biomasse diminue de façon importante par rapport à d'autres endroits de l'unité concernée de même pluviosité. Des critères plus précis seront présentés à la fin de II.4.5.2. L'identification et la détermination des superficies dégradées sont importantes, car l'estimation théorique de la production ne peut s'y appliquer (II.3.4).

Deux formes peuvent être distinguées, qui sont à nouveau fonction du paysage. Sur les sols limoneux, le ruissellement est intensifié par le compactage superficiel provoqué par un pâturage trop intensif (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-144). Ceci entraîne une plus grande redistribution de l'eau et une plus grande hétérogénéité de la végétation avec risque d'érosion en nappe (limon sablonneux, photos II.3b et d ; argile limoneux, photo II.9b). Lorsque l'unité en question est située à la limite d'une dépression argileuse (photo II.9b, en haut à droite : F44) ou d'une unité à substrat sablonneux (photo II.7b), la limite de la dégradation correspondra souvent à la limite de l'unité. On peut même se demander si la limite à droite de la zone dégradée sur la photo II.9b ne représente pas une frontière entre les unités. Ou alors, la zone à droite pourrait être une partie non dégradée de la même unité, avec une production normale de la biomasse. Sans le travail sur le terrain et/ou d'autres informations, il n'est pas possible de faire cette différenciation, car les effets de ce type de dégradation (ruissellement accru et donc diminution de la disponibilité en eau) ressemblent fortement aux effets d'une diminution de la pluviosité moyenne (voir également photo II.4). Les photos aériennes ne permettent d'évaluer l'importance de la dégradation qu'à condition que les unités se situent dans une certaine zone de pluviosité et qu'à l'intérieur des unités il y ait des zones à forte et faible biomasse. Il est ainsi possible de déterminer si les plaines de la photo II.8 sont dégradées. En l'absence d'autres informations, il est également difficile de déterminer si l'unité avec des sols limoneux, située en bas à gauche de la photo II.9d, est dégradée ou non : il est également possible qu'une pluviosité moyenne de 300 mm soit insuffisante sur ce type de sol pour permettre une végétation plus dense.

La photo-interprétation permet de porter plus aisément des jugements sur la seconde forme principale de dégradation : pâture trop intensive sur un substrat sablonneux. Pour qu'une diminution de production

dans ces conditions soit discernable sur les photos aériennes, l'intensité de pâture doit être telle que dans la pratique elle ne se présente qu'à proximité immédiate des points d'abreuvement, situés ou non près de villages (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 359-361). Aux endroits pourvus de sols sablonneux, la disponibilité en eau n'est pas influencée négativement, alors que l'apport d'engrais entraîne même une augmentation de la disponibilité en éléments nutritifs. Cette forme de dégradation est la conséquence de l'atteinte à la capacité biologique de reproduction (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 369). Sur les photos aériennes, elle se manifeste par des aires concentriques autour d'un village ou d'un puits, la couverture végétale diminuant à mesure qu'on approche du centre (photos II.9c et d) : différentes espèces végétales s'y sont installées dont la longueur du cycle et la production diminuent à mesure qu'on approche du centre. Lorsque la pluviosité moyenne est de moins de 300 mm/an environ, des zones de sable vif risquent de se former à proximité du point d'abreuvement ou sur les crêtes des dunes (photo II.9e). Ce phénomène est expliqué dans III.4.4.3.

Un cas particulier de surpâture sur du sable est celui où la végétation a eu la possibilité d'évoluer vers une situation où elle est dominée par des espèces non ou à peine broutées par le bétail. Dans ce cas, cet accroissement de la couverture végétale autour ou dans les environs d'un village et d'un puits est discernable sur les photos.

Localement, dans le delta mort, une végétation de strate herbacée dominée par *Cassia tora* peut ainsi s'installer sur des sols sablonneux autour d'un village ou d'un puits. Lorsque les espèces ligneuses dominent la végétation, on parle d' « embroussaillement ». Cette forme de dégradation apparaît généralement dans la savane et diminue au fur et à mesure de la raréfaction des pluies vers le nord, tout en persistant plus longuement sur des sols sablonneux.

Lors de l'établissement de la carte provisoire, on peut se demander si un tel embroussaillement a eu lieu autour de Léré. Il peut également s'agir d'une unité fondamentalement différente de la plaine sablonneuse située au pied de l'ensemble éolien, au flanc NO du delta mort, avec laquelle elle présente de nombreuses similitudes, mis à part le recouvrement (carte en annexe, transect 2, unité E72). En effet, ailleurs, cette unité ne comporte pratiquement pas d'arbres, même aux alentours des petits villages (comparer l'unité en bas à gauche sur la photo II.9d avec celle en haut à gauche sur la photo II.8a).

Lors de l'utilisation des photos « fausses couleurs » ou des photos en couleurs naturelles, il peut apparaître que des unités classifiées ensemble sur la base de critères de disponibilité en eau, se différencient par rapport à la couleur du substrat. Cette différence de couleur peut indiquer une différence d'origine ou d'utilisation et donc une différence de disponibilité en éléments nutritifs. Autant de raisons de cartographier séparément ces unités. Sur le trajet cartographié, ce phénomène s'est présenté dans le nord de la région : les zones qui, sur la base de leur physionomie de végétation, étaient classées comme des unités à sols sablonneux, apparaissaient sur les photos de couleur jaune ou rouge. Lors du travail sur le terrain, il est apparu que ceci provenait de l'origine des dépôts sablonneux : éolien (jaune) et éléments érodés de l'ensemble détritique (rouge). Le changement ne concernait pas exclusivement la couleur : le sable rouge présentait localement un relief plus prononcé et était plus difficilement accessible aux voitures de terrain.

Il est préférable de cartographier les transitions visibles sur les photos aériennes entre les unités ou types de paysage en tant que complexe. La photo II.10 illustre un exemple de transition entre les unités de paysage « ensemble fluviatile ou lacustre » et « ensemble éolien » : la couche de sable déposée à partir de l'ensemble éolien sur l'ensemble fluviatile est parfois tellement faible que l'ensemble fluviatile ou lacustre affleure. La diversification entre ces unités de paysage a été réalisée parce que d'éventuelles différences de fertilité du sol pouvaient provenir de différences d'origine. En indiquant la zone de transition comme un complexe, il est possible de tenir compte de ces différences : la fertilité du sol sera ici une moyenne pondérée des unités avoisinantes. Pour la disponibilité en eau également, il est préférable d'utiliser une moyenne pondérée. Dans ces complexes, il est en effet rarement question de mosaïques régulières, comme c'est le cas dans les photos II.2, II.4 et II.8a et b , où les unités à ruissellement et à concentration des écoulements peuvent aisément être distinguées (unités de paysage uniforme ou composées à l'intérieur d'une unité ou d'un type de paysage).

D'autres exemples de transition au niveau des unités géologiques et géomorphologiques apparaissent dans la photo II.6a (entre l'ensemble détritique et l'ensemble fluviatile) et la photo II.7a (entre l'ensemble détritique et l'ensemble éolien). Les exemples au niveau du type de paysage sont illustrés par les photos II.9c (l'eau perdue des champs de riz irrigués pénètre les unités du delta mort) et II.9e (transition entre le plateau latéritique et le sable).

Lorsque les photos ne permettent pas de distinguer clairement un complexe, mais que les informations géologiques l'attestent, il est préférable d'affecter cette région à l'unité de paysage qui domine de manière la plus évidente le complexe. C'est le cas pour les situations présentées dans la photo II.3 : plaines alluviales limoneuses et argileuses du delta mort, avec dépôts d'épaisseurs variables de sable limoneux d'origine alluviale et éolienne. Les mosaïques régulières de la photo n'entraînent pas non plus de problèmes sérieux pour l'estimation de la redistribution de l'eau.

II.3.3. Travail sur le terrain à la fin de la saison sèche

II.3.3.1. Observations au niveau de l'unité

Comme indiqué dans le schéma II.1, il faut vérifier une première fois la carte provisoire et la rectifier si nécessaire avant que la saison de pluies ne commence. Dans le cadre de la méthode présentée ici, cela implique non seulement la confirmation des limites tracées, mais surtout la vérification des éléments qui entrent pour une grande part dans la détermination de la disponibilité en eau : l'altitude relative, le relief, la profondeur et la texture du sol. La plus grande partie de cette caractérisation du substrat peut être effectuée pendant la saison sèche. Lorsqu'il n'existe pas de cartes pédologiques de la région à évaluer, il faudra déterminer la texture et la profondeur du sol. Cette opération est possible pendant cette période de travail sur le terrain, à condition de choisir les trépans adaptés au sol sec. Cette période de travail sur le terrain permet également de vérifier les estimations faites lors de la photo-interprétation, pour ce qui concerne les surfaces à ruissellement, à infiltration homogène et à concentration des écoulements.

Une réponse doit être apportée aux questions spécifiques soulevées par la photo-interprétation. Certains exemples ont déjà été donnés dans la section précédente : différence entre les sables « rouge » et « jaune », le « collier » de sols sablonneux à bonne infiltration (photo II.7b), les termitières (photo II.5b), etc.

Au niveau des unités, il faut qu'une impression générale se dégage quant au taux de recouvrement ligneux, à l'importance des graminées pérennes productives (tableaux IV.1 et IV.2), à la charge de pâture et au taux de dégradation, afin de permettre un choix de sites représentatifs.

Lorsque peu d'informations sur la disponibilité en eau d'abreuvement dans la région à évaluer sont disponibles, il est conseillé, pendant cette période de travail sur le terrain, de vérifier s'il existe encore de vastes régions (centaines de km2) où la strate herbacée est peu ou pas exploitée. Ceci pourrait révéler des manques d'eau d'abreuvement. Une analyse plus poussée sera nécessaire pour vérifier la justesse de cette hypothèse. L'exploitation limitée de ces régions pendant la période de sécheresse peut également résulter de la faible qualité du fourrage, ou de l'absence d'élevage significatif.

II.3.3.2. Choix des sites

Au cours de cette période de travail sur le terrain, il faut opérer un choix de sites. Ces sites seront également utilisés pour les observations à la fin de la période des pluies. Compte tenu de l'inévitable variabilité, même à l'intérieur d'unités choisies avec soin, un grand nombre d'observations serait nécessaire par unité, pour obtenir une estimation fiable de la production par exemple. Cependant, procéder à un grand nombre d'observations sur l'unité toute entière entraîne des problèmes pratiques de taille (temps, main-d'oeuvre, frais). C'est pourquoi il est conseillé de choisir des sites qui, sur la base de la première impression globale de l'unité, sont représentatifs de celle-ci.

Lors de cette évaluation semi-détaillée, chaque unité est, si possible, subdivisée en sous-unités : aires avec ruissellement ($I < P$), avec concentration des écoulements ($I > P$) et avec infiltration homogène ($I = P$). En principe, il faudra un choix de plusieurs sites représentatifs sur chacune de ces sous-unités. Il n'est pas possible d'indiquer simplement, à partir de considérations statistiques, le nombre de sites devant être échantillonnés par unité (des publications dans le journal Documents phytosociologiques, Nouvelle Série ; Lewis & Taylor, 1967 ; Godron *et al* ., 1969). Il est néanmoins souhaitable de choisir plusieurs sites (au minimum 3) par (sous-)unité, de façon à pouvoir juger avec une certaine fiabilité les éventuelles divergences entre les données obtenues sur le terrain et les estimations théoriques. Dans une région pour laquelle par exemple 10 unités de paysage ont été distingués (= 20 à 30 sous-unités), il faudra échantillonner au minimum 60 à 90 sites. Dans le cas où le nombre de sites doit être réduit, il est préférable de ne pas échantillonner toutes les unités, plutôt que de diminuer le nombre de sites par unité. Les critères retenus pour la sélection des unités à échantillonner sont l'importance de la superficie par rapport à d'autres unités, et l'importance de l'unité du point de vue de l'élevage.

Parallèlement au caractère représentatif, la proximité de stations pluviométriques et l'accessibilité doivent constituer des critères lors du choix des sites. Si nécessaire, des pluviomètres devront être installés dans les villages les plus proches des sites, dont l'enregistrement devra être prévu pendant la

saison des pluies. L'enregistrement de la pluviosité est nécessaire pour permettre l'interprétation des données recueillies à la fin de la période des pluies (II.3.6).

II.3.3.3. Observations sur le site

Il faut examiner les schémas récapitulatifs II.4, II.11 et II.12 pour obtenir une vue d'ensemble des observations à faire à la fin de la saison sèche et à la fin de la saison des pluies.

Caractérisation des sites

Pour estimer le coefficient de ruissellement (R) sur le site, il faut déterminer la texture du sol et son évolution dans le profil. Le tableau I.1 permet de déterminer l'ordre de grandeur de la valeur R, compte tenu d'une texture déterminée. Cette valeur peut être précisée en faisant entrer en ligne de compte le relief (la valeur R est directement proportionnelle à l'importance de la déclivité) ainsi que le taux de dégradation de la végétation et du sol (le compactage superficiel et la formation de croûtes entraînent une augmentation de la valeur R, III.2.4 ; Casenave & Valentin, 1990). Ce dernier critère est parfois d'utilisation délicate, car les restes végétaux de la strate herbacée sont rarement encore présents à cette période ; c'est pourquoi les observations de la végétation à la fin de la saison des pluies peuvent donner lieu à une révision de la valeur R (II.3.6.3).

Il existe des exemples de surestimation de la valeur R. Lorsque les dunes sont plus ou moins prononcées, avec généralement une texture grossière ; en fonction de cette texture, la valeur R peut être estimée à zéro ou à une valeur très faible. Compte tenu des grandes différences dans le taux de recouvrement ligneux sur les dunes et les vallées, la tendance générale est de réévaluer ce ruissellement vers le haut en argumentant de la trop grande déclivité. Dans ce cas, la différence dans le taux de recouvrement ligneux provient souvent d'une redistribution hétérogène de l'eau dans la vallée même, le substrat y étant un peu moins sablonneux. Il se peut également que la texture du sable composant ces dunes soit si grossière, que la faible capacité de stockage entraîne une percolation profonde de l'eau qui devient alors disponible dans la vallée. Cette situation est rare cependant. Une détermination précise de la texture sur les dunes et dans les vallées, permet une bonne interprétation de la situation.

La valeur R de sols limoneux des plateaux latéritiques dans la savane est parfois si petite qu'elle peut être négligée. Contrairement à ce que laisse supposer la texture, l'infiltration est ici très bonne à cause de la présence de beaucoup de gravier latéritique sur et dans le sol. Les observations de la seconde période de travail sur le terrain feront apparaître que la strate herbacée est dans un tel cas très homogène et relativement peu diversifiée, et qu'elle est dominée par des graminées C_4 à germination rapide (II.3.6.2).

Malgré une bonne infiltration, le taux de recouvrement ligneux peut être hétérogène, car le sol est peu profond et dans le sous-sol l'eau s'écoule sur une couche latéritique, tout en se concentrant localement, par exemple dans les crevasses.

Eventuellement, on peut mesurer la capacité d'infiltration du sol et estimer la rugosité de la surface, soit la valeur *CS* (Driessen, 1986 ; Casenave & Valentin, 1990) : la valeur R peut être calculée sur la base de

ces données (II.2.3). La mesure de la capacité d'infiltration comporte cependant des inconvénients : il s'agit d'un travail très intensif et d'autre part, l'utilisation d'anneaux d'infiltration entraînant des perturbations de la structure du sol risque de faire surévaluer fortement les valeurs d'infiltration (Hoogmoed & Stroosnijder, 1984 ; Stroosnijder & Hoogmoed, 1984).

Pour déterminer le risque de pertes par percolation (*Pe*), il est nécessaire de déterminer la profondeur moyenne du sol.

Le facteur f ne peut être évalué à partir des observations d'une seule année. En effet, ce facteur s'établit sur la moyenne de la charge de pâture et de la fréquence des feux des dix dernières années au moins (voir II.3.4). Constater la fraction de la strate herbacée ayant disparu au cours de la précédente saison sèche, peut contribuer à une évaluation plus fiable du facteur f. La cause doit en être précisée : feux et/ou pâture. La biomasse restante peut être évaluée par comparaison avec des quantités standard de foin dans des dossiers en plastique transparent. La charge de pâture peut être déduite à partir de traces directes et indirectes (fumier), de l'état du sol (compactage superficiel) et parfois de la forme de croissance des espèces ligneuses sélectionnées par le bétail.

Là où subsiste une biomasse importante, il faut vérifier si, outre la paille de la saison passée, il subsiste une couche de litière de matériel plus ancien. Dans ce cas, la végétation sera généralement plus dynamique qu'ailleurs (II.3.6) car ceci atteste d'une activité limitée des termites.

Observations sur les espèces ligneuses

La méthode de calcul de la production de feuilles, de tiges et de fruits d'arbres et d'arbustes à partir de l'estimation du taux de recouvrement, est expliqué dans II.2.2.2 . La figure II.8 illustre la valeur d'une estimation du taux de recouvrement. Cette figure compare ce type d'estimations pour les unités de paysage de la carte en annexe, avec les mesures sur le terrain. La valeur mesurée moyenne correspond environ à la valeur estimée ; il en résulte que la méthode d'évaluation pour une évaluation globale de grandes surfaces est donc valable (II.2). Il ressort cependant de la dispersion (influences antropogènes) que le taux de recouvrement doit être déterminé sur le terrain pour permettre des évaluations plus détaillées. Cette détermination du taux doit être effectuée au cours de la présente période, car le taux de recouvrement est, entre autres, nécessaire pour l'estimation théorique de la production de la strate herbacée (II.3.4) et celle-ci doit être réalisée avant que le travail sur le terrain à la fin de la saison des pluies, ne débute.

Pour une bonne caractérisation de la disponibilité du fourrage ligneux, d'autres données sont nécessaires en plus du taux de recouvrement (schéma II.2). Il est également préférable de recueillir ces données au cours de cette même période de travail sur le terrain, sinon le programme de mesure, dans la seconde période de travail sur le terrain à la fin de la saison des pluies, devient trop chargé.

Figure II.8

Taux de recouvrement mesuré de toutes les espèces ligneuses en tant que fonction du taux de recouvrement estimé pour les unités de paysage de la partie 3 de [la carte (annexe)](#).

o : sites inondés ; x : autres unités ; —— : mesure = estimation.

Schéma II.2
Données nécessaires pour déterminer la disponibilité et la qualité du fourrage des espèces ligneuses, devant être obtenues par observation, échantillonnage et analyses, ou par l'intermédiaire des études.

observation	ordre de grandeur	méthode
disponibilité (par unité de paysage)		
densité par espèce	n/ha	comptage par unité de superficie
ø projection des couronnes par espèce	m^2	estimation des nombres par catégorie de ø croissant de projection des couronnes
taux de recouvrement par espèce	%	calcul sur base de ce qui précède
taux de recouvrement total	%	estimation
fraction accessible	%	estimation
évolution de la biomasse	g/branche	minimum deux observations
qualité (par espèce, si inconnue)		
taux d'azote et de phosphore	g/kg	
taux de tanin	g/kg	espèces appétées
appétibilité	-	spécification par espèce

Aire minimum à échantillonner
Pour permettre des jugements fiables, l'aire à échantillonner doit en principe être déterminée par unité de paysage (des publications dans le journal Documents phytosociologiques, Nouvelle Série ; Lewis & Taylor, 1967 ; Godron *et al*., 1969). L'étendue de cette aire est également dépendante du type de données.

Une recherche personnelle dans le sud du Sahel a montré que la caractérisation des espèces ligneuses exige généralement des aires plus grandes que pour la strate herbacée (II.3.5). Ainsi, pour déterminer la composition floristique, 5 ha ne sont pas suffisants pour couvrir toutes les espèces, même dans le cas de végétations relativement homogènes dans les dépressions argileuses (F46 ; carte en annexe).

L'aire à échantillonner se réduit lorsqu'on se limite aux espèces qui prennent en compte au moins 5 % du

total du recouvrement ligneux : elle varie alors entre 1 ha pour les végétations homogènes (F46) et 3 ha pour les végétations peu homogènes (dépressions dunaires, F33a ; carte en annexe).

Par unité distinguée, il faudra échantillonner de nombreuses fois cette aire minimum pour déterminer la densité ou le taux de recouvrement par espèce. Pour déterminer la densité de l'ensemble de tous les arbres et arbustes, avec une fiabilité de 90 % et un coefficient de variation (CV) de 20 %, il faut 4 × 1 ha (aires limoneuses, F41-42 ; carte en annexe) et 5 × 1 ha (anciennes dunes usées, F20 ; carte en annexe). Le coefficient de variation a été calculé comme suit :

CV = ([sigma]/[racine carrée]n) × 100/x

dans laquelle
[sigma] = la déviation standard ; n = le nombre de relevés ; x = la valeur moyenne.

Pour une fiabilité accrue (95 %) et un coefficient de variation plus faible (10 %), il aurait déjà fallu 25 et 30 ' 1 ha pour les deux unités. Le nombre d'hectares à échantillonner augmente lorsque la densité des espèces individuelles doit être déterminée avec une certaine fiabilité.

Pour déterminer le recouvrement en gardant les mêmes exigences de fiabilité, l'aire minimum à échantillonner se situe dans le même ordre de grandeur : en fonction de l'homogénéité de la végétation, il faut de 5 à 10 relevés de 1 ha pour se prononcer sur le recouvrement par l'ensemble des espèces avec une fiabilité de 90 % et un coefficient de variation de 20 %.

Dans la pratique, par manque de moyens ou de main d'oeuvre, l'évaluation semi-détaillée ne permet que rarement ou jamais une fiabilité des mesures au niveau des espèces. Puisque le calcul de la production des espèces ligneuses utilise le taux de recouvrement par l'ensemble de toutes les espèces ligneuses, l'aire minimum pour l'échantillonnage doit être déterminée sur la base de ce taux de recouvrement. Nos recherches ont montré que dans le nord du Sahel ouvert, il est préférable de prendre une unité d'échantillonnage de 100 × 100 m². Dans le sud du Sahel, la surface doit souvent être plus réduite (50 × 50 m²) car la plus grande densité des espèces ligneuses ne permet plus dans la pratique l'échantillonnage d'aires plus étendues. Notamment pour les fortes densités d'espèces ligneuses de taille relativement petite (brousse tigrées, savanes arbustives et aires à « embroussailement »), il est préférable de travailler sur des bandes de 5 m de large maximum, la longueur de la bande étant déterminée par l'étendue des unités de végétation.

Les photos aériennes permettent parfois de déterminer le taux de recouvrement ligneux de l'ensemble. Dans les champs, le taux de recouvrement peut être estimé à une rapidité acceptable à l'aide de la méthode des points quadrats alignés (Daget & Poissonet, 1971 ; Poissonet & Poissonet, 1969) le long d'un transect, du moins lorsque le taux de recouvrement est supérieur à 10-15 %. Le taux de recouvrement ainsi déterminé ne correspondra pas nécessairement au taux de recouvrement total obtenu par une addition des taux de recouvrements par les espèces individuelles : notamment dans les cas de hautes densités des espèces ligneuses, les couronnes des arbres/arbustes individuels se chevaucheront.

Dans ce cas, le taux de recouvrement total obtenu par addition des espèces individuelles dépassera le taux de recouvrement réel (voir exemple dans le tableau II.12).

Observations par espèce
Malgré le peu de fiabilité dans le cas d'aires d'échantillonnage trop restreintes, il importe lors des relevés, de recueillir au moins une impression du recouvrement, de la densité et de l'accessibilité par espèce. Dans I.2.5 et II.2.3, il était difficile de traduire la production de pâturage aérien en disponibilité pour les ruminants, car les données de base, à savoir le recouvrement ligneux, n'y était pas précisé par espèce et caractéristiques de l'espèce (appétibilité et accessibilité) et qu'ils ne pouvaient donc être pris en considération. La solution choisie dans I.3.4 (bovins et ovins ne mangent pas les fourrages ligneux, contrairement aux dromadaires et aux chèvres) manque de précision pour une évaluation semi-détaillée : la disponibilité en fourrage pour les bovins et les ovins est ainsi sous-estimée et celle pour les dromadaires et les chèvres surestimée. Dans cette optique, il est utile de recourir à la classification de « non appétible » et « recherché par une ou plusieurs espèces de bétail ». Même dans le cas d'un échantillonnage relativement réduit, la fiabilité de ces données est satisfaisante, notamment dans le cas de la dominance de l'un des deux groupes.

Comme il est indiqué dans le schéma II.2, il faut déterminer par espèce la densité (le nombre d'individus par unité de superficie) par catégorie de grandeur. La mesure est représentée par le diamètre de la projection des couronnes, qui est considérée comme une surface à périmètre circulaire. Les catégories sont par exemple 0-1 m, 1-2 m, 2-5 m 5-10 m, etc. Ainsi il est possible de calculer le recouvrement total par espèce. En additionnant les valeurs des espèces individuelles et en exprimant le recouvrement par espèce ou par groupe d'espèces en tant que fraction de la somme, il est possible d'estimer la contribution par espèce ou par groupe au recouvrement total déterminé séparément (pour des taux de recouvrement supérieurs à 10-15 %).

La partie accessible peut être précisée par une estimation à vue de la fraction du volume total des couronnes se situant en-dessous d'une hauteur limite donnée. La limite pour les dromadaires, les bovins et les chèvres est fixée respectivement à 3 m, 2 m et 1,5 m. En agissant par espèce et en fonction de chaque catégorie de grandeur, il est possible de calculer une moyenne pondérée pour, par exemple, le groupe des espèces mangées fréquemment.

La densité par catégorie de grandeur des espèces individuelles fournit en soi également des informations de valeur, à condition d'en établir une répartition des fréquences. La dimension du recouvrement par les couronnes est, dans un certain sens, proportionnel à l'âge, ce qui permet d'obtenir la composition de la population selon les âges. Une diminution régulière du nombre d'individus au fur et à mesure de l'augmentation de la classe d'âge atteste d'une population peu ou pas perturbée, alors qu'une composition irrégulière atteste de perturbations dues à une surexploitation, à la sécheresse et/ou aux feux (figure II.9). Si l'on veut conserver la disponibilité existante de fourrage ligneux, des mesures de gestion seront indispensables.

Figure II.9

Répartition des fréquences (F = fraction du nombre total d'observations) des taux de recouvrement de toutes les espèces ligneuses réparties en catégories de grandeur (1 à 12) d'une population non ou peu perturbée ([noir]) et d'une population perturbée ([blanc]).

Evolution de la production annuelle

Outre l'estimation de la production annuelle des espèces ligneuses sur la base du taux de recouvrement, il importe également d'estimer l'évolution de la biomasse au cours des saisons. Pour ce faire, deux observations au moins sont nécessaires : à la fin de la saison sèche (biomasse minimum) et à la fin de la saison des pluies/début de la saison sèche (biomasse maximum). Si possible des relevés pourraient encore être effectués au cours de la saison sèche, compte tenu de l'importance des espèces ligneuses pour l'alimentation au cours de cette période.

Pendant la période d'échantillonnage, le poids du feuillage est mesuré (et en fonction du stade phénologique, mesure est également faite du poids des jeunes tiges, fleurs et fruits) sur un nombre de branches standard d'individus représentatifs (Hiernaux, 1980b). Ceci doit être effectué pour les espèces les plus importantes, vu leur dominance, les préférences du bétail et la durée de persistance du vert pendant la saison sèche. La représentativité des individus est notamment déterminée par leur grandeur et leur stade phénologique. Il est indiqué d'effectuer la standardisation des branches à échantillonner sur la base du diamètre à l'endroit de la coupe. Parallèlement, le degré et le type de ramification de la partie soumise à l'échantillonnage doivent être pris en considération. Cette standardisation divergera d'une espèce à l'autre, mais le choix du diamètre de la coupe peuvent porter en général sur des valeurs entre 0,5 et 1,5 cm.

Le résultat de ces mesures donne une indication relative de la biomasse. Cette indication permet d'exprimer la disponibilité au cours de l'année en tant que fraction de la production annuelle estimée. Lorsque la formation ou le mûrissement des fruits tombe en dehors de la période d'observation, la biomasse des feuilles mesurée à la fin de la saison de croissance doit être multipliée par 1,15, à moins de connaître les valeurs exactes de la production de fruits par rapport à la production des feuilles.

Qualité

En comparaison avec les espèces herbacées, la qualité chez les espèces ligneuses constitue une caractéristique beaucoup plus liée à l'espèce et moins dépendante de l'habitat. C'est pourquoi, lors de la caractérisation du fourrage ligneux, il est possible d'utiliser des données recueillies à d'autres endroits, à moins qu'une grande précision ne soit exigée. Ceci constitue un avantage, compte tenu du travail que représente un échantillonnage représentatif et les frais d'analyse. La partie IV comprend un résumé des données dont disposent les auteurs en matière de N, de P, de teneur en tanin et de digestibilité (tableau IV.15).

Tableau II.12

Densité (n/ha) et recouvrement par les couronnes (% de la superfie totale) des espèces ligneuses de l'unité paysage F20, pour 8 relevés individuels de 1 ha et valeurs moyennes avec écart type pour quelques espèces (isohyète 550 mm, 1979)

	1		2		3		4		5		6		7		8		M	
	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%	n / ha	%
Commiphora africana	12	0 ,6	12	2,1	11	0,3	2	0 ,3	7		3		2		19	0,7	8±6	0,5 ±0,7
Guiera senegalensis	87	1 ,4	157	2,6	91	0,9	35	0 ,3			155	3,1	86	3,4	146	2,2	95 ±57	1,7 ±1,3
Acacia Seyal	24	5,0	28	3,3	66	9,9	102	12 ,2	62	11 ,1	68	2,7	13	1 ,9	53	2,6	52 ±29	6,1 ± 4,3
Combretum aculeatum	1												34	0,2	80	1,6	14	0,2
Zizyphus mauritiana	2	0 ,2	1	0,5	7	0,2	2	0,1	1		1		6	0,7	6	0,3	4±3	0,6 ±1,0
Combretum ghasalense					1				1		1		15	0,9	5	0,1	3	0,1
Dichrostachys glomerata	5	0,1			1		4										1	0,0
Grewia bicolor	2	1,5	1		1		2		7	0,5	4	0,2	1		8	0,4	3	0,3
Acacia Senegal	58	5,2			3	9,2			2	0,1	5	0,2	4	0,1			9	0,7
Sclerocarya birrea	1	1,1	5	4,4	40	16,0	3	1,4			7	7,7	9	5,8	11	6,8	9 ±13	5,4 ±5,1
Combretum micranthum											1						0	0,0
Balanites aegyptiaca			1		30	0,9	24	1,5	47	1,9	2						13	0,5
Ximenia americana			3	0,1	4	0,1	13	0,2	1						+		3	0,1
Feretia apodanthera					1								1				0	0,0
Boscia salicifolia							1				1				1		0	0,0
Pterocarpus lucens									2	0,6	2	1,1					1	0,2

Acacia raddiana							2	0,8								0	0,1	
Boscia senegalensis									1				1			0	0,0	
Piliostigma reticulatum											3	0,3				0	0,0	
Terminalia avicennoides											4	1,3				1	0,2	
Bauhinia rufescens													1			0	0,0	
n /ha	195		208		256		188		132		251		182		331		218 ±60	
%		13,9		13,1		28,6		16,0		15 ,3		14,2		15,0		14,9		16,4 ± 5,0

Un exemple

Pour illustrer ce qui précède, voici quelques résultats de nos propres relevés.

Le tableau II.12 réunit les résultats de 8 relevés de 1 ha chacun. Il s'agit de relevés effectués en 1979 sur le massif sablonneux à l'intérieur de la zone fluviatile (carte en annexe, F20) au Ranch de Niono. L'*Acacia seyal* (6,1 %) est l'espèce la plus importante pour le taux de recouvrement, et *Guiera senegalensis* (95/ha) est l'espèce la plus importante pour la densité. Le taux de recouvrement de *Sclerocarya birrea* est plus élevé que celui de *Guiera* (5,4 contre 1,7 %), alors que la densité n'est que de 9/ha. L'ensemble de ces trois espèces déterminent principalement la densité et le recouvrement par la population totale et donc de la production : 72 % de la densité totale (218/ha) et 80 % du recouvrement total (16,7 %).

Malgré l'homogénéité relative de cette unité et l'étendue de la superficie étudiée (8 ha !) la fiabilité des résultats au niveau des espèces est limitée : pour le recouvrement moyen par des couronnes, le coefficient de variation pour les espèces *Acacia seyal*, *Sclerocarya birrea* et *Guiera senegalensis* s'élève respectivement à 25, 27 et 35 %. Pour les espèces *Commiphora africana* et *Ziziphus mauritiana*, présents dans les 8 relevés, le coefficient de variation pour, par exemple, le recouvrement par des couronnes est déjà respectivement de 49 et 59 %. Les coefficients de variation pour la densité et le recouvrement par les couronnes, pour la population toute entière, ne sont respectivement que de 10 et 11 %.

Le taux de recouvrement de la totalité de la population (16,4 %) permet de calculer la production du

feuillage, des tiges et des fruits (II.2.2.3) ; sur une base de 570 mm de pluie par an (p50%) et R = 0,2, ces productions sont respectivement de 600, 210 et 90 kg/ha et dans les années sèches (p10%) respectivement de 420, 150 et 6 kg/ha.

En supposant que la production par espèce soit proportionnelle à la part des espèces dans le recouvrement total (obtenu par addition des taux de recouvrement déterminés par espèce), il est possible de calculer la production par espèce. Pour Acacia seyal cela signifie par exemple une participation dans la production de 610/1670 × = 36,5 %, et donc une production de feuilles, tiges et fruits de respectivement 219, 77 et 33 kg/ha.

Hiernaux (1980b) a déterminé, entre autres pour *Acacia seyal*, la relation entre la grandeur de la projection des couronnes et l'accessibilité (fraction de pâturage aérien en-dessous de 2 m de haut). A l'aide de nos observations, la répartition des fréquences a pu être établie pour les classes de projection des couronnes, ce qui a permis de calculer la moyenne pondérée de l'accessibilité (32 %) pour cette espèce (figure II.10). En d'autres termes, sans abattage par les bergers, le bétail peut en principe avoir accès à 0,32 × (329-33) + 33 = 128 kg/ha de la production moyenne annuelle de cette espèce. Il est supposé dans le présent calcul que la quantité de fruits (tombés à terre ; 33 kg/ha) est accessible en totalité. Ceci signifie que sur la population *Acacia seyal*, 39 % de la production annuelle sera accessible. Pour l'ensemble des espèces ligneuses de l'unité F20, se situant dans la zone de transition du Sahel vers la savane, environ 30 % de la production annuelle sera disponible (II.2.3) : donc 0,3 × 900 = 300 kg/ha. Ceci ne signifie cependant pas qu'il est indiqué de laisser consommer cette quantité annuellement (III.4.2.2.).

Figure II.10
Répartition des fréquences (F = fraction du nombre total d'observations) de taux de recouvrement d'Acacia seyal, répartie en catégories de grandeur (Ranch de Niono, 1979, substrats sablonneux) et relation entre la fraction de feuillage et de rameaux en dessous de 2 m de hauteur avec des catégories de taux de recouvrement de même espèce.

Seuls quelques doutes subsistent quant à l'appétibilité de *Commiphora africana*, *Combretum ghasalense* et *Ximenia americana* (comparer le tableau II.12 avec le tableau IV.14). Compte tenu de leur contribution au recouvrement, 4 % de la production de pâturage aérien, ne doivent pas être considérés comme fourrage disponible, et le fourrage ligneux disponible atteint donc 290 kg/ha.

La qualité du fourrage ligneux peut être déduite du tableau IV.15 : pour le taux d'azote la moyenne pondérée obtenue est de 16 g/kg ; la digestibilité de la matière organique est au maximum 35 %. Le taux d'azote varie de 17 (matière jeune) à 14 g/kg (matière ancienne) et la digestibilité de la matière organique de 40 à 30 % (II.2.2.3 et tableau II.9). La feuille, c'est-à-dire 2/3 de 290 kg/ha est de qualité légèrement supérieure : le taux d'azote varie de 24 (jeune) à 20 g/kg (vieux) ; la digestibilité varie de 55 à 40 %.

Acacia seyal, l'espèce la plus importante, possède un taux élevé de tanin (tableau IV.15), et il faut en

conclure que la disponibilité en fourrage ligneux pour un bétail autre que les dromadaires et les chèvres, est de peu d'importance dans cette unité de paysage.

Tout comme la qualité, la disponibilité varie dans le temps. La figure II.11 illustre cette variabilité pour *Acacia seyal* en 1977, une année où les premières pluies sont tombées au début juin. Le maximum a été atteint en octobre, au mois de décembre 10 % en subsistait. Plus tard, au cours de la saison sèche, la disponibilité devenait même égale à zéro. Pour l'unité dans son ensemble, la disponibilité est également pratiquement nulle, car les deux espèces à feuillage persistant *Boscia* présentent un taux de recouvrement négligeable (tableau II.12).

Figure II.11
Développement de la biomasse des feuilles d'Acacia seyal au cours des saisons en tant que fraction (F) de la biomasse maximum atteinte (Ranch de Niono, 1977).

Il ressort de la répartition des fréquences de taux de recouvrement par des couronnes, que les années de sécheresse extrême 1972-1974 ont menacé la production de pâturage aérien, bien que la mortalité des arbres au Ranch soit restée limitée (Togola *et al.*, 1975). Pour *Acacia seyal* par exemple, les individus avec un recouvrement par la couronne < 1 m² ne représentaient pas 5 % de la population totale sur les substrats sablonneux du Ranch en 1975 (F20, F31 et F33). Il apparaissait ainsi qu'il n'était pratiquement plus question de renouvellement. En 1979 la catégorie du plus petit recouvrement représentait à nouveau une part de 20 % de la population ; malgré la persistance de la faible pluviosité, le rajeunissement a redémarré.

II.3.4. Estimation théorique du rendement d'azote (N_b)

Avant la seconde période de travail sur le terrain qui débute à la fin de la période des pluies, il faut estimer la quantité d'azote (N_b) pouvant être contenue dans la biomasse aérienne de la strate herbacée pendant les années à pluviosité moyenne (p50%). La procédure suivie est en principe identique à celle utilisée pour l'évaluation globale (II.2.2). Néanmoins, deux éléments seront approfondis de façon à permettre une estimation plus précise, adaptée davantage à cette évaluation plus détaillée, à savoir :
- précision de la quantité d'eau infiltrée, par subdivision des unités en surfaces avec ruissellement, surfaces avec concentration des écoulements et surfaces à infiltration homogène ;
- calcul de N_b à l'aide d'équations, ce qui permet d'inclure dans l'évaluation, les données précisées par unité lors de la première période de travail sur le terrain.

Estimation de la quantité d'eau infiltrée (*I*)

Capacité de stockage d'eau d'une unité
La capacité de stockage d'eau d'une unité détermine la quantité de pluie pouvant tomber en l'espace d'un temps donné, avant que l'eau ne disparaisse hors de l'unité. Cette capacité de stockage dépend de la capacité d'infiltration et de la capacité de stockage des sols de l'unité, ainsi que du relief de cette unité.

La capacité de stockage d'un sol est déterminée par la texture et par la profondeur de ce sol : un sol profond à texture fine (limon ou argile) peut stocker une grande quantité d'eau, ce qui n'est pas le cas d'un sol peu profond à texture grossière (sable). Le stockage de l'eau dépend également de la capacité d'infiltration du sol : pour les sols à faible capacité d'infiltration, le risque est grand, surtout lorsqu'ils sont inclinés, que l'eau ne ruisselle avant qu'elle n'ait pu être stockée. Les faibles valeurs de capacité d'infiltration vont souvent de pair avec une texture fine, les valeurs élevées avec une texture grossière.

L'importance du ruissellement (le coefficient de ruissellement) est également fonction de la rugosité de la surface du sol : présence de gravier, de microdépressions, de végétation ou de restes de végétation, etc. La rugosité de la surface du sol occasionne un ralentissement du ruissellement, ce qui augmente la capacité de stockage d'une zone déterminée. Le macro-relief d'une unité a également son importance : le nombre, l'étendue et la profondeur des dépressions déterminent la quantité d'eau pouvant être stockée.

Les pertes d'eau hors d'une unité dépendent de la quantité de pluie qui tombe dans cette zone et de la distribution de ces précipitations dans le temps ; en d'autres termes, la valeur limite n'est pas absolue. Dans le cas d'une pluviosité faible très disséminée, la valeur limite ne sera pas dépassée, même pour les unités à faible capacité de stockage. Par contre, de fortes pluies en un temps très court risquent même de dépasser la valeur limite d'unités à grande capacité de stockage. Les pertes d'eau importantes d'une unité en faveur des unités avoisinantes apparaissent clairement sur les photos aériennes, par la présence de profils de drainage (par exemple photos II.6c et 7a) ou par la concentration de végétation dans la zone de transition vers les autres unités (par exemple photos II.6c et 7b).

Unités ne présentant pas de pertes en faveur des unités avoisinantes
L'estimation de *I* pour les unités qui ne perdent pas d'eau en faveur des unités avoisinantes, et qui n'en reçoivent pas non plus, est relativement simple. Deux situations peuvent se présenter : aucune redistribution à l'intérieur de l'unité (par exemple photo II.1) ou bien l'inverse (par exemple photo II.2). Dans le premier cas *I* est égal à la pluviosité (*P*).

Dans le second cas, l'unité est subdivisée en surfaces, parts de la surface totale où l'eau ruisselle (SUR_{ru} ; $I < P$), parts de la surface où l'infiltration est homogène (SUR_{ho} ; $I = P$) et parts de la surface où les écoulements se concentrent ($SUR_{dé}$; $I > P$). A l'aide du rapport de surface de ces parts, des coefficients de ruissellement (R) et de la pluviosité, il est possible de calculer *I* pour les différentes parts de l'unité, à l'aide des équations suivantes :

$$I_{ho} = P \qquad \text{(équation II.12)}$$

$$I_{ru} = P \times (1 - R) \qquad \text{(équation II.13)}$$

$$I_{dé} = (SUR_{ru}/SUR_{dé}) \times (P \times R) + P \quad \text{(équation II.14)}$$

dans lesquelles
P = la pluviosité moyenne (p50%, mm/an);
R = le coefficient de ruissellement des parties avec ruissellement ;
I_{ho}, I_{ru} et $I_{dé}$ = les quantités d'eau infiltrée (mm/an) sur respectivement les parts de l'unité où l'eau s'infiltre de façon homogène, où l'eau ruisselle et où les écoulement se concentrent.

Dans l'unité composée de dunes parallèles (photo II.2), $I_{dé}$ et I_{ru} sont par exemple respectivement de 855 et 380 mm/an (SUR_{ru} = 80 %, $SUR_{dé}$ = 20 % ; R = 20 % et P = 475 mm/an). Dans cette unité, aucune part à infiltration homogène n'a été distinguée (SUR_{ho} = 0 %).

Unités présentant des pertes en faveur des unités avoisinantes
Dans le cas d'unités avec pertes d'eau, il est supposé qu'une partie de l'eau des parts avec ruissellement n'atteint pas les parts avec concentration des écoulements ou n'y reste pas. Pour ces unités également, I peut être calculé pour les différentes parts de l'unité, à l'aide des équations mentionnées ci-dessus. Mais il faut soustraire de Idé la quantité d'eau sortant de l'unité :

$$I_{dé} = (SUR_{ru}/SUR_{dé}) \times (P \times R) + P - (1/SUR_{dé}) \times (P \times Kr) \quad \text{(équation II.14a)}$$

dans laquelle K_r (ruissellement perdu) est égal à la fraction de la pluviosité qui disparaît de l'unité. Cette part dépend du taux de ruissellement des parts à ruissellement (R) et de la partie de la surface totale de l'unité où les écoulements se concentrent ($SUR_{dé}$), mentionnées dans le tableau II.13 (voir plus loin III.2.4).

Tableau II.13
Fraction de la pluviosité qui disparaît hors d'une unité (K_r) en tant que fonction du coefficient de ruissellement (R) et du rapport entre la superficie des aires à concentration des écoulements ($SUR_{dé}$) et la superficie totale d'une unité. Les valeurs présentées ici de K_r sont valables pour des superficies de la taille des unités dans l'évaluation semi-détaillée.

	(superficie $SUR_{dé}$) / (superficie totale)							
R	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70

sable									
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
	0,20	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
limoneux									
	0,30	0,12	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03
	0,40	0,16	0,12	0,10	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04
	0,50	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05
	0,60	0,24	0,18	0,14	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06

Les situations les plus répandues dans la pratique sont en jaune.

La photo II.6a illustre une telle unité (C22 : partie 3 de la carte en annexe). Depuis cette unité, de l'eau s'écoule vers le vallée située au centre de la figure, reconnaissable par le profil de drainage. Selon l'équation II.14a, la valeur *I*dé de cette unité est égale à 794 mm/an (SUR_{ru} = 65 % ; $SUR_{dé}$ = 35 % et R = 0,5, donc K_r = 0,09, et *P* = 475 mm/an) et selon l'équation II.13, la valeur I_{ru} est égale à 238 mm/an.

Unités recevant les écoulements des unités avoisinantes
Dans certains cas, il est clair qu'une unité ou une partie de l'unité reçoit de l'eau de l'unité avoisinante. Les photos II.7b et II.6c en donnent des exemples. Dans le dernier exemple, la bande avec concentration des écoulements, limitrophe de l'ensemble détritique, n'a pas été cartographiée comme unité séparée. Si des sites y ont été choisis, il est néanmoins nécessaire d'estimer séparément la valeur de *I* pour la bande en question. L'équation II.14 permet de faire cette estimation, cependant SUR_{ru} est à présent égal à la surface de ruissellement de l'unité avoisinante, et $SUR_{dé}$ à la surface de la bande en question. Pour l'exemple représenté dans la photo II.7b, la surface de la crête rocheuse est égale à SUR_{ru} et la surface du collier avec les sols sablonneux est égale à $SUR_{dé}$.

Dans le cas de ces exemples, il n'y a pas de pertes vers des unités plus éloignées. Par contre, dans la photo II.6a, ces pertes ne font aucun doute : la vallée située au centre, avec un profil de drainage, reçoit l'eau des unités avoisinantes mais perd également de l'eau en faveur de l'unité située en contrebas, ce qui est attesté par la continuation du fossé de drainage. Dans le cas de cette vallée, *I* peut être estimé à l'aide de l'équation II.14a. SUR_{ru} est à présent remplacé par la somme des superficies des unités limitrophes dont l'eau provient, $SUR_{dé}$ représente la superficie de la vallée. R est remplacé par une moyenne pondérée des valeurs de K_r, établie sur la base de la surface. Dans l'hypothèse où la vallée n'aurait pas de capacité de stockage significative, en d'autres termes, si elle a un sol peu profond, pas de seuils, et pente vers l'ensemble fluviatile en bas à droite sur la photo, un cours d'eau se formerait pendant la saison des

pluies. La moyenne pondérée des valeurs K_r est alors égale au coefficient de ruissellement d'un bassin, ce qui a constitué la raison du choix du nom connu en hydrologie (facteur K_r ; III.2.4).

A titre d'exemple, l'analyse de *I* a été développée pour la vallée de la photo II.6a. Cette unité (C42) reçoit de l'eau à partir de deux unités : l'unité C22 déjà citée en exemple, et l'unité C24 (voir partie 3 de la carte en annexe). Les superficies de C22, C24 et C42 présentent un rapport de 1 : 3 : 1. K_r avait déjà été déterminé pour l'unité C22 (0,09) ; selon le tableau II.13, K_r est égal à 0,055 ($SUR_{dé}$ = 35 % et R = 0,5) pour l'unité C24. La moyenne pondérée des deux valeurs de K_r est alors ((3/5x0,055 + 1/5x0,09)/((3 +1)/5) = 0,065. A l'aide de l'équation II.14a il est possible de calculer la valeur maximum de *I* pour la vallée : 598 mm/an (*P* = 475 mm/an ; R = K_r = 0,065 ; SUR_{ru} = (C22+C24)/(C22+C24+C42) = (1+3)/(1 +3+1) = 0,8 ; $SUR_{dé}$ = C42/(C22+C24+C42) = 1/(1+3+1) = 0,2).

Calcul de N_b

Tout comme pour l'évaluation globale, il s'agit tout d'abord d'estimer, pour chaque unité, la production des arbres et des arbustes. La base de cette évaluation repose sur le taux de recouvrement estimé sur le terrain, la pluviosité et *I* dans les années moyennes (II.2.2.3). Dès lors, il est possible de déterminer la disponibilité en fourrage ligneux par unité, grâce aux données recueillies sur le terrain (voir exemple dans II.3.3.3). Il est encore trop tôt pour estimer l'évolution de la disponibilité en fourrage ligneux au cours de l'année, car ceci nécessite les données qui seront recueillies lors de la seconde période de travail sur le terrain. Par contre, il est possible de calculer la disponibilité en fourrage pendant les années sèches (II.2.2.3).

Suit alors le calcul de N_{lh} pour les situations où le taux de recouvrement (rc) par les espèces ligneuses est > 15 % et/ou celles où les espèces ligneuses présentent plus de 2 couches de feuillage (équation II.2). L'équation II.3 permet d'estimer f_{lh} nécessaire à la présente équation, en se basant sur les pertes annuelles d'azote de la strate herbacée (f ; figure II.4). Lorsque les observations sur le terrain et la documentation (taux d'exploitation et feux) font apparaître une valeur f beaucoup plus élevée ou plus basse, il faut bien entendu procéder à un ajustement (voir III.2.2.3). En dernier lieu, pour ce genre de situations, N_b est déduit de N_{lh} (II.2.2.3).

Pour estimer N_b dans des situations où le taux de recouvrement ligneux est inférieur à 15 % et où ces espèces présentent moins de trois couches de feuillage, la procédure suivie est différente de celle de l'évaluation globale. Deux situations ont été différenciées : *I* égal ou inférieur à 250 mm/an ou *I* supérieur à 250 mm/an.

Lorsque *I* est égal ou inférieur à 250 mm/an, il est supposé que la production de la strate herbacée peut être déduite directement de la disponibilité en eau. Lorsque les sols sont profonds (plus de 2 m), il n'y a

pas de pertes par percolation d'eau à plus de 2 mètres de profondeur (voir figure II.12). Pour les sols moins profonds, il faut vérifier s'il y a risque de pertes par percolation. Pour ce faire, il faut tout d'abord calculer le taux d'humidité pour pF 2,5 à l'aide de l'équation II.5 et en fonction de la texture constatée sur le terrain. A l'aide de *I* et du taux d'humidité pour pF 2,5 il est possible de calculer à l'aide de l'équation II.6, la profondeur du sol à laquelle les pertes par percolation interviennent. Une comparaison avec la profondeur moyenne du sol constatée sur le terrain, permet de déterminer l'existence de telles pertes. Dans l'affirmative, il faudra calculer la quantité (*Pe*) avec l'équation II.4, et la déduire de *I*.

Figure II.12
La quantité d'eau qui tout juste humidifie les deux premiers mètres du profil de sol jusqu'à la capacité au champ, sans être accompagnée de percolation, en rapport avec le taux d'humidité à la capacité au champ (à pF 2,5 ; H).
$I = 2340 \times H + 172$.

La production peut être calculée à l'aide d'un modèle de simulation comportant une description quantitative du bilan hydrique. Sur la base de tels calculs, une relation a été constatée entre *I* et la production de la biomasse de la strate herbacée (*B* en kg/ha) :

$B = 7{,}25\ (I\text{-}Pe) - 593$ (équation II.15)

III.2.2 traite plus en détail des calculs susmentionnés.

Le taux d'azote (g/kg) peut ensuite être obtenu à l'aide de la pluviosité et de la quantité d'eau infiltrée de la figure II.3.

N_b (kg/ha) découle alors de :

$N_b = B \times$ taux d'azote/1000 ($N_b \leq 10{,}9$ kg/ha ; équation II.16)

Pour la valeur de N_b ainsi calculée, un maximum a été fixé, pour escompter le fait que la croissance est de moins en moins limitée par l'eau seule, quand *I* s'approche de 250 mm (III.2.2.3).

Pour *I* supérieur à 250 mm/an, on suppose que la production de la strate herbacée dépend de la disponibilité en azote. Dans ce cas, N_b est directement calculé à l'aide de l'équation II.7, après qu'on ait vérifié s'il y a des pertes par percolation (*Pe*). Pour des sols profonds, la figure II.12 (ou l'équation accompagnante) permet d'évaluer rapidement pour quelle valeur de *I* ceci sera le cas (voir II.2.2.4 pour les sols peu profonds et pour le calcul des pertes). Une fois encore la valeur f devra être ajustée dans le cas de besoin.

Calcul de N_b pour des végétations à taux élevé de graminées pérennes

Dans certains cas, le travail sur le terrain aura fait apparaître une telle densité de touffes de graminées pérennes productives (tableaux IV.1 et IV.6) sur plus de 10 % de la surface de certaines unités, qu'il est évident que celles-ci domineront la production de la biomasse de la strate herbacée pendant la saison des pluies. A la fin de la période de croissance, les graminées pérennes transmettent une partie de N aux éléments subsistants (éteule et racines) ; c'est pourquoi les pertes d'azote sur la totalité de la végétation (f_{pa}) seront moindres. La valeur f d'une telle végétation peut être estimée à l'aide de l'équation suivante, parallèlement à l'estimation dans le cas d'un recouvrement ligneux dépassant 15 % (équation II.3) :

$$f_{pa} = (rc_p \times f_{pé}) + (1 - r_{cp}) \times f \qquad \text{(équation II.17)}$$

dans laquelle :
rc_p = le taux de « recouvrement » par les graminées pérennes (II.3.5 fin) ;
$f_{pé}$ = les pertes d'azote des graminées pérennes ($f_{pé} = 0{,}4 \times f$), mais sa valeur est toujours supérieure à 0,2 ;
f = les pertes d'azote des espèces annuelles (égal à la valeur f de la figure II.4 ou estimée sur la base des observations sur le terrain).

La plupart du temps N_b ne pourra être estimé pour ces unités, qu'après la prochaine période de travail sur le terrain, car ce n'est qu'à ce moment que la dominance des graminées pérennes peut être constatée de manière satisfaisante.

Pour le cas où > 50 % de la surface d'unité présente une strate herbacée composée de graminées pérennes, il est recommandé de négliger les pertes d'azote par percolation (III.2.3). Lors de l'utilisation de l'équation II.7, *Pe* sera alors égal à zéro : le rendement d'azote (N_{pa}) est estimé à l'aide de l'équation II.2, comme dans le cas d'un recouvrement ligneux > 15 %, en remplaçant N_{lh} et f_{lh} par respectivement N_{pa} et f_{pa}.

Une végétation à abondance relative des graminées pérennes sera souvent caractérisée également par un taux de recouvrement ligneux élevé. Le calcul de N_b est ainsi basé sur l'équation II.2. Le taux de recouvrement cumulé des ligneux et des graminées pérennes doit être utilisé dans ce cas comme valeur de rc : la fraction du site ayant un recouvrement par les espèces ligneuses et/ou par les graminées pérennes ; (1-rc) est ainsi la fraction du site occupée par des espèces annuelles en plein air.

La méthodologie n'a pas été développée pour de telles situations et il faut prendre à coeur l'avertissement à la fin de III.2.6.2 !

II.3.5. Travail sur le terrain à la fin de la saison des pluies

II.3.5.1. Vue d'ensemble des unités

Bien que les observations aient été prévues sur des sites représentatifs, il est utile de se former une idée générale sur les unités au cours des trajets d'un site à l'autre. A cette occasion, il importe de s'intéresser à l'homogénéité et à la physionomie de la végétation, à la présence de graminées pérennes et au recouvrement ligneux. Cette vue d'ensemble permet de juger le degré de représentativité des sites choisis, d'expliquer les différences éventuelles entre les sites et de vérifier l'exactitude de la carte provisoire des unités de paysage ainsi que la caractérisation des unités.

Le degré d'homogénéité de la végétation, l'importance des variations dans l'espace de la biomasse et de la composition floristique, fournissent des indications supplémentaires quant au degré de dégradation supposé dans une unité. A la fin de la saison de croissance, il est plus aisé de déterminer quelle partie de la superficie n'est pas recouverte par de la végétation.

La physionomie de la végétation, sa composition exprimée en groupes d'espèces (ligneuses et herbacées, dicotylédones, C_3 et C_4 ; graminées et légumineuses), leur distribution, la répartition de la biomasse, etc., fournissent des informations complémentaires qui peuvent être utiles lors de la vérification du coefficient de ruissellement estimé.

Bien que le degré de recouvrement ligneux ait déjà été déterminé au cours de la précédente période de travail sur le terrain, un contrôle à la fin de la saison de croissance peut fournir des informations quant à la partie de la population encore en vie. Ceci vaut également pour les graminées pérennes.

II.3.5.2. Observations sur les sites

Objectifs et spécificités

Les observations à la fin de la période sèche (II.3.3) servent, outre la vérification de la carte des unités de paysage, à permettre l'évaluation théorique par unité, de la production et du taux d'azote des pâturages (II.3.4). Par contre, les observations dont il est question ici, servent à déterminer l'utilité des évaluations théoriques par unité. Bien que les estimations soient basées sur le bilan hydrique de chaque unité, et que les pertes annuelles d'azote soient prises en considération, ces estimations sont néanmoins basées sur un niveau moyen de fertilité du sol. En effet, il n'a pas (encore) été possible de déduire la productivité des pâturages dans la région à partir de paramètres de fertilité (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 57-61). Les observations sur le terrain à la fin de la période des pluies, notamment pour la production et le taux d'azote de la strate herbacée, doivent permettre d'identifier les unités où la fertilité du sol s'écarte du niveau moyen à un point tel que les observations en question sont à privilégier par rapport à l'évaluation théorique de la productivité des pâturages.

Compte tenu de la forte variabilité d'une année sur l'autre, la situation d'une année quelconque divergera de la situation moyenne, supposée lors des calculs. Néanmoins, les observations d'une année quelconque

peuvent être utilisées pour vérifier la bonne estimation de la situation moyenne. Pour cela il est nécessaire, en plus des mesures de la production et du taux d'azote de la strate herbacée, d'effectuer des observations sur la végétation concernant des facteurs qui ont codéterminé cette production et ce taux d'azote pour l'année en question. Sur la base de ces observations et de la pluviosité enregistrée pour l'année, si possible par unité, la production et le taux d'azote de l'année observée peuvent être ramenés à une situation moyenne.

Seront utilisés pour ce faire : la contribution des divers groupes d'espèces à la production totale de la strate herbacée, la recherche d'indices de feux et de pâture récents ainsi que de recul ou de disparition de populations de graminées et d'espèces ligneuses, et la détermination du taux de phosphore de la strate herbacée. Ce dernier élément fournit également une indication supplémentaire quant à la qualité. Pour de plus amples précision quant à la qualité (digestibilité de la matière organique), il est utile d'analyser également les échantillons de la strate herbacée du point de vue du taux de cellulose brute et de cendre.

Période d'observation

Dans la méthode présentée, l'azote de la biomasse aérienne revêt une place centrale, aussi, la période d'observation optimale semble se situer directement après la floraison (maximum de la quantité absorbée pendant la saison de croissance). Au cours de la phase de maturation, des pertes d'azote et de biomasse peuvent déjà intervenir (chute des graines), ce qui entraîne l'obligation de corriger les données (voir question 7a : II.3.6.5). Dans la pratique, il apparaît cependant que cette période n'est pas très appropriée, car le terrain est souvent inaccessible. La plupart du temps ce n'est qu'à la fin septembre que le travail sur le terrain pourra commencer. Pour que la prise d'échantillons se fasse au plus tôt après la floraison, il faudra toujours commencer par les sites les plus septentrionaux.

Superficie minimale à échantillonner

Pour bon nombre d'observations, il faut d'abord fixer sur le terrain la superficie de l'aire d'échantillonnage, ainsi que le nombre de répétitions pour assurer la fiabilité requise (Godron *et al*., 1969). Les travaux de Breman & Spitters (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 28-35), de Grouzis (1988) et de Betlem (1989) fournissent quelques indications préalables, relatives à la composition floristique et à la biomasse. Ces travaux ont été effectués (principalement) dans la zone sahélienne. Les valeurs seront donc éventuellement différentes pour la zone soudanaise.

Breman et Spitters indiquent que pour une végétation homogène, 15 à 20 relevés de 1 m² chacun suffisent pour déterminer la composition floristique (95 % de probabilité de rencontrer chaque espèce). Dans le cas d'une végétation hétérogène, le nombre de relevés est de 30. Une à cinq répétitions suffisent lorsque seules les espèces qui représentent plus de 5 % de la biomasse totale sont prises en considération. Breman et Spitters ont constaté que pour définir la biomasse, les coefficients de variation par rapport à la moyenne étaient de 25 % et 15 % pour une biomasse moyenne de respectivement moins de 500 kg/ha et plus de 2000 kg/ha, dans le cas de 12 relevés de 1 m² chacune. Les coefficients de variation pour la biomasse moyenne des espèces individuelles qui représentent plus de la moitié de la

biomasse totale, est dans ce cas de 10 à 30 % pour les végétations homogènes et de 30 à 70 % pour les végétations hétérogènes.

Grouzis (1988) a établi que pour trois unités de végétation, la superficie d'échantillonnage optimale était de 1 m² pour déterminer la moyenne de la biomasse. Les surfaces plus grandes n'apportent pas de précisions supplémentaires. Par ailleurs, il a déterminé le coefficient de variation de la moyenne, en tant que fonction du nombre de répétitions pour une superficie à échantillonner de 1 m² (figure II.13). Il en résulte que pour la végétation la plus hétérogène (glacis), on obtient un coefficient de variation stable à partir de 30 à 40 relevés. Pour la végétation homogène (bas-fonds), le nombre de relevés nécessaires se situe entre 10 et 20.

Figure II.13

Coefficient de variation de la biomasse moyenne (CV ; %) en relation avec le nombre de répétitions (n) pour des végétations homogènes (bas-fond ; [rond noir]), des végétations hétérogènes (glacis ; x) et des végétations intermédiaires (dunes ; rond).

Selon Grouzis, 1987.

Observations sur la strate herbacée

Sur chaque site, la strate herbacée est caractérisée et récoltée sur 10 à 40 sites de 1 m² chacun. Le nombre de sites est déterminé en fonction de l'homogénéité de la végétation, laquelle est une fonction du substrat et du degré de dégradation du pâturage. Le coefficient de ruissellement estimé sur la base des observations pendant la saison sèche, peut servir de point de départ. En règle générale, 10, 15, 30 et 40 × 1 m² suffiront à condition que R soit respectivement < 0 ; 0 ; 0,3 ; et 0,6.

On décrit par m² la composition floristique, à l'aide de l'estimation de la contribution de chaque espèce à la biomasse (+, 10, 20, 30 %, etc.). Ensuite, chaque m² est moissonné séparément, les légumineuses étant séparées des autres espèces. Le poids frais des légumineuses et du reste de la biomasse est enregistré. La récolte distincte des légumineuses sert un double objectif : déterminer leur contribution à la production d'azote de la végétation, et déterminer et accroître la fiabilité des estimations de la contribution des espèces individuelles à la production totale. Sur le total du matériel récolté, un échantillon de biomasse légumineuse et un échantillon de biomasse non légumineuse est prélevé pour chaque site. Ces échantillons sont soigneusement séchés pour déterminer le poids de la matière sèche et pour les analyses de laboratoire mentionnées plus haut.

A partir de la contribution des espèces individuelles au m² de biomasse, on calcule la contribution moyenne pour l'ensemble du site. Ensuite, on détermine la contribution par groupe d'espèces, si nécessaire à l'aide de IV.2 : graminées pérennes, graminées annuelles, légumineuses et autres espèces. Les graminées annuelles et les autres espèces doivent être subdivisées en espèces à germination rapide et en espèces à germination lente ou hétérogène ; les autres espèces sont ensuite resubdivisées sur la base du mécanisme de photosynthèse (C_3 ou C_4). Ce ne sont que les graminées pérennes très productives, ayant une forte force de concurrence au cours de la croissance, qui devront être séparées des graminées

annuelles (tableaux IV.1 et IV.6).

Le nombre total d'unités et de sites peut être tellement important qu'il est impossible d'effectuer par site un échantillonnage de la biomasse sur 10 à 40 × 1 m². Dans ce cas, une méthode peut être choisie selon laquelle l'estimation de la biomasse remplace partiellement les mesures (par exemple 't Mannetje & Haydock, 1963).

Le « recouvrement » par les graminées pérennes doit être estimé, si elles forment un composant non négligeable de la strate herbacée. Cette valeur est indispensable pour le calcul de N_b dans ce cas (II.3.4 fin). « recouvrement » signifie ici la fraction du site où les graminées pérennes composent (presque) 100 % de la végétation. Cette fraction sera plus basse que la contribution à la biomasse herbacée, car la biomasse plus élevée par unité de surface.

II.3.6. Interprétation et application des observations

II.3.6.1. Approche

Les observations sur le terrain, obtenues par la méthode présentée ici, exigent une application appropriée, compte tenu de leur spécificité. Les éléments de la méthode d'interprétation sont représentés dans le Schéma II.3;a-d. Un jeu de questions-réponses guidera l'utilisateur d'un élément à l'autre.

Schéma II.3
Eléments de la méthode d'interprétation.

---

a. Evaluation de la composition floristique	
a1. Différences entres les sites d'une même unité	
OUI	NON
Appréciation des causes Conséquences pour poursuite de l'utilisation des sites (questions 1a à 1d comprise)	voir b
a2. Ecart par rapport à la composition escomptée	
OUI	NON
Appréciation du caractère de l'écart (questions 2a à 2c comprise)	voir b
a3. Ecart de la durée du cycle de l'espèce dominante	
OUI	NON
Appréciation du caractère de l'écart (question 3)	voir b

voir b

b. Vérification des paramètres pour le calcul de N_b

b1. Ecart de la valeur de I (question 4)

OUI	NON
Nouvelle estimation de I	voir c

b2. Ecart de la valeur de f (question 5)

OUI	NON
Nouvelle estimation de la valeur de f	voir c

b3. Recalcul de N_b

voir c

c. Standardisation du rendement mesuré d'azote (N_m)

c1. Contribution légumineuses autres que 5 % de la biomassa

OUI	NON
Standardisation contribution des légumineuses (question 6; N_i)	$N_m = N_i$ voir d

c2. Ecart de pluviosité en quantité et en répartition comparé à une année moyenne

OUI	NON
Standardisation des effets de la pluviosité (question 6 N_s)	$N_i = N_s$ voir d

voir d

d. Comparaison de N_s avec N_b

d1. Différences significative entre N_s en N_b

OUI	NON
Caractère accidentel de l'écart (questions 8a à 8d comprise)	choix pour N_b

NON	OUI
d2. N_s inférieur à N_b	choix pour N_b

OUI	NON
Caractéristique de l'écart (questions 9a à 9c comprise)	voir d3
temporaire / permanent	
choix pour N_s (et N_b) / choix pour N_s	

d3. N_s supérieur à N_b

Caractéristique de l'écart (questions 10a à 10c comprise)	
permanent / temporarire	
choix pour N_s	choix pour N_s (et N_b)

Les observations sur la végétation jouent un rôle important, tandis que la dynamique de la végétation est grande. C'est pourquoi la première étape consiste à évaluer la composition floristique sur les sites, pendant l'année d'observation (II.3.6.2). Les différences éventuelles entre les sites, à l'intérieur d'une même unité provisoire de paysage, sont décelées car ces différences peuvent entraîner une nouvelle subdivision.

Ensuite, il s'agit d'apprécier la représentativité de la végétation pendant l'année d'observation. Il s'agit là surtout de déterminer le caractère accidentel, temporaire ou permanent des écarts éventuels pouvant intervenir par rapport à la végétation normale, compte tenu de la pluviosité moyenne et du substrat. Accidentel qualifie un écart résultant d'un événement unique, et qui n'exerce aucun effet sur la végétation future. Temporaire concerne un écart résultant d'une modification de circonstances s'étalant sur une période plus longue. En principe, ce processus est réversible lorsque les circonstances se modifient à nouveau. Permanent est le qualificatif utilisé pour les écarts de longue durée, qui persisteront, même si les circonstances qui ont engendré ces écarts se modifient. La connaissance des espèces herbacées et leurs caractéristiques importe pour cette partie du traitement des observations. IV.2 peut apporter une solution si cette connaissance fait défaut. Loin de toutes les espèces y sont décrites en détail cependant. L'assimilation d'une espèce peu connue avec une espèce bien connue d'un(e) même groupe/famille (tableau IV.1) pourrait être choisie comme une solution, dans le cas d'une ressemblance en ce qui concerne la répartition et l'écologie (tableaux IV.6 et IV.6).

Ensuite, sur la base des observations effectuées lors de la dernière période de travail sur le terrain, il s'agira de vérifier si les estimations de l'infiltration (*I*) et de pertes moyennes annuelles en azote de la biomasse aérienne (f) doivent être réajustées (II.3.6.3). Des informations additionnelles concernant l'intensité de la pâture et le taux de recouvrement par les graminées pérennes peuvent entraîner une révision de la valeur f. Une modification des valeurs de *I* et de f entraîne un nouveau calcul de N_b.

L'étape suivante est constituée par la standardisation du rendement d'azote mesuré (N_m ; mesure de la quantité totale de N dans la biomasse aérienne de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance). Ceci signifie une conversion vers une situation dans laquelle le N_b théorique est valable : une strate herbacée dont la biomasse se compose pour 5 % de légumineuses, et une année à pluviosité moyenne (p50%) en quantité et en répartition (II.3.6.4). Le N_m standardisé est appelé N_s.

N_s est alors comparé au N_b calculé (II.3.6.5). Lorsque ces valeurs divergent il faudra décider de la valeur qui constituera la base pour les estimations de la capacité de charge et de la production animale possible (II.5).

Consécutivement au choix entre N_b et N_s, la biomasse disponible de la strate herbacée peut être calculée à l'aide de l'estimation du taux d'azote (II.3.6.6).

Enfin, le paragraphe II.3.6.7 indique comment déduire la quantité d'azote disponible dans des situations divergentes de l'année moyenne (p50 %). Compte tenu de l'estimation de la capacité de charge, la conversion vers une année sèche (p10%) est cruciale. Mais il est également intéressant de vérifier si des interventions augmentant *I* et/ou diminuant f permettent d'augmenter la disponibilité en azote. Lorsque la disponibilité en azote change, il faut également recalculer la biomasse.

A plusieurs reprises on a souligné que les méthodes classiques d'estimation conviennent davantage à l'évaluation de la végétation des plaines d'inondation. Dans ces cas, les paragraphes qui suivent ne sont pas d'application, et le choix se portera directement sur la mesure de l'azote dans la biomasse aérienne (N_m) constituant la base du calcul de la capacité de charge. En principe, la méthode présentée pourrait être appliquée sur les plaines d'inondation, comme cela a déjà été le cas au Soudan (den Held, 1983). Mais pour obtenir une précision suffisante, il faut adapter les paramètres de l'équation N_b, compte tenu de la fertilité relativement élevée du sol, de l'adaptation de la végétation souvent pérenne, de l'anaérobie et, lors des inondations, de son influence sur la dénitrification.

II.3.6.2. Evaluation de la composition floristique

La composition floristique observée au cours de la seconde période de travail sur le terrain, est évaluée en trois étapes pour chaque unité de paysage (schéma II.3a). Outre la composition floristique de la strate herbacée, un grand nombre d'autres observations relevées au cours des deux périodes de travail sur le terrain seront utilisées (schéma II.4).

Schéma II.4
Vue d'ensemble des observations et données principales utilisées pour les trois étapes consécutives de l'évaluation de la composition floristique.

	interprétation de différences à l'intérieur d'une unité	représentativité de la végétation observée du point de vue	
		des groupes d'espèces	de la longueur du cycle
composition floristique			
- groupes d'espèces	x	x	
- espèces herbacées dominantes	x		x
- espèces ligneuses dominantes	x		
recouvrement espèces ligneuses	x	x	
physionomie de la végétation	x	x	
sort de la végétation			
- pâture	x	x	
- feux	x	x	
- agriculture	x	x	
sol	x	x	
climat		x	x
- pluviosité	x	x	x

Question 1 : La composition floristique diffère-t-elle sur les sites à l'intérieur d'une unité ?

Si la réponse est négative, il faut passer à la question 2. Lorsque les sites d'observation à l'intérieur d'une même unité présentent des végétations différentes, il faut tout d'abord décider de l'opportunité d'une subdivision de l'unité, à l'aide des questions 1a à 1d. Cette subdivision s'impose lorsque les différences sont vraisemblablement de caractère permanent, par exemple par suite de différences dans l'intensité d'exploitation.

Question 1a : Les sites sont-ils réellement situés dans la même unité de paysage, telle que caractérisée par la pluviosité et le substrat ?

Les limites de pluviosité d'une unité risquent notamment d'être choisies sur une base trop large. Dans ce cas, les différences se concrétiseront surtout au niveau des espèces dominantes. Lorsque ces différences se situent parallèlement aux isohyètes, et que la longueur de la phase végétative des espèces dominantes diminue proportionnellement à la pluviosité moyenne, il y a lieu de subdiviser une fois encore l'unité de paysage. Voici quelques exemples d'une telle situation où les espèces sont remplacées au fur et à mesure

de la diminution de la pluviosité : *Diheteropogon hagerupii* remplacée par *Schoenefeldia gracilis*, *Schoenefeldia gracilis* par *Cenchrus biflorus* et *Zornia glochidiata* par *Tribulus terrestris*. D'autres observations peuvent contribuer à la décision de procéder à de nouvelles subdivisions, telles que les modifications dans le recouvrement ligneux et/ou dans la composition floristique, apparaissant parallèlement aux isohyètes. Il peut par exemple se produire une modification de dominance vers le sud : *Balanites aegyptiaca* par *Acacia raddiana*, et *Acacia raddiana* détrôné par *Combretum glutinosum* (unités E7 ; carte en annexe). Certaines indications peuvent également être fournies par les modifications dans la biomasse de la strate herbacée ou sur la partie de la surface qui est nue. Exemple : brousse tigrée (C, carte en annexe).

Lorsque aucune des raisons mentionnées ne justifie de reconsidérer la subdivision, les différences entre les sites sont probablement dues aux différences dans le passé de la strate herbacée au cours de l'année ou des années précédentes.

Question 1b : Y a-t-il des différences d'intensité d'exploitation entre les sites ?

Il est parfois difficile de distinguer les origines des différences entre les sites car l'influence de l'intensité d'exploitation sur la composition floristique correspond partiellement à l'influence décrite ci-dessus provoquée par la diminution de la pluviosité du sud au nord (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 352-384 : Djitèye, 1981 ; Niamir, 1987). Cependant, si c'est l'intensité d'exploitation qui constitue le facteur principal, il est fort probable qu'à côté de différences dans la durée des cycles des espèces dominantes, il soit question de différences dans l'importance relative des groupes d'espèces. Les phénomènes caractéristiques sont alors : évolution des graminées pérennes vers des espèces annuelles, évolution de graminées vers les dicotylédones et évolution d'espèces à germination rapide vers des espèces à germination plus lente. Ces évolutions ne présenteront pas de correspondance avec les isohyètes.

Il importe de vérifier si les différences de charge de bétail à l'intérieur de l'unité sont accidentelles ou permanentes. Une charge de bétail accidentelle importante peut occasionner des modifications dans la composition de la strate herbacée lorsque les sols sont à infiltration (relativement) homogène. Si, sur de tels sols, la période de pluie hésite à s'installer et si le bétail transhumant vers le nord s'y arrête, il se peut que la jeune végétation d'espèces à germination rapide soit entièrement rasée. Lors de la reprise des pluies, la végétation qui s'installera sera composée d'espèces à germination lente. *Cenchrus biflorus* ou *Schoenefeldia gracilis* par exemple, seront alors remplacés par une dominance d'*Elionurus elegans*, *Eragrostis tremula* et *Borreria spp*. Une telle situation se reconnaît également par l'absence d'autres indices « typiques » de forte exploitation, la végétation « normale » peut alors être déduite à partir de la végétation observée (voir question 2 et suite).

Lorsque l'intensité d'exploitation est importante et permanente, les modifications dans la composition de la strate herbacée sont accompagnées d'autres modifications, telles que spécifiées dans le Schéma II.5;.

Schéma II.5

Phénomènes liés à une exploitation forte des pâturages en dehors de ceux concernant la composition de la strate herbacée.

	Sahel		savane	
	$I < P$	$I \geq P$	$I < P$	$I \geq P$
répartition hétérogène des espèces et de leur biomasse végétale	++	+	++	+
déclin du recouvrement ligneux	+	+		
augmentation du recouvrement ligneux		(+)		++
rabougrissement des espèces ligneuses	+	+	+	+
baisse de la production herbacée	++	+	++	+
augmentation de la production			(+)	(+)

I = infiltration ; P = pluviosité ; (+) = localement.

La répartition hétérogène de la biomasse signalée dans le tableau, est de plus asymétrique, une partie de la surface est nue.

Lorsque la composition floristique est analysée selon la méthode des points quadrats alignés, on obtient une relation entre le nombre d'espèces et la fréquence des espèces, sous forme de deux ou de plusieurs répartitions logarithmiques normales au lieu d'une seule (Poissonet *et al*., 1989).

L'embroussaillement se rencontre même dans le Sahel proprement dit, lorsque la stimulation des espèces ligneuses, due à la diminution de la concurrence avec la strate herbacée, n'est pas annulée par un accroissement de l'exploitation du bois. C'est ce qui se produit dans des situations où il y a beaucoup de bétail et peu d'humains.

La croissance de la production de la strate herbacée est plus rare et plus localisée. Dans ce cas, les espèces non broutées comme par exemple *Cassia tora* se fixent à des endroits à grand apport de fumier.

Les deux cas d'accroissement de la production en présence de surpâturage ont le maximum de chances de se produire sur des sols à très bonne infiltration. Ailleurs, la formation de croûtes et le ruissellement accru de l'eau provoquent un processus inverse.

Pour quelqu'un d'expérimenté dans l'évaluation des pâturages, une exploitation intensive permanente se reconnaît dès la première période de travail sur le terrain. Dans ce cas, le choix des sites couvre alors aussi bien les parties à forte intensité d'exploitation, que les parties à intensité plus faible ou nulle (II.3.3). Deux estimations théoriques différentes sont ainsi faites pour N_b (II.3.4) et deux vérifications pour une unité. Il se peut que pour la partie soumise à une exploitation intensive, la quantité d'eau infiltrée (I) ait été mal estimée pour les unités dominées par des sols à ruissellement. Les auteurs de ce manuel ne disposaient pas encore de données leur permettant d'indiquer dans II.3.3.3 l'accroissement de

ruissellement par rapport aux combinaisons substrat, durée et intensité du surpâturage. Les observations sur le terrain, citées ci-dessous, peuvent entraîner une modification de *I* (II.3.6.3).

Question 1c : Les différences signalées sont-elles dues au feu ?

Sur les substrats sablonneux, notamment dans le sud du Sahel, où l'activité des termites est relativement faible, et où en l'absence de pâture intensive ou de feux, s'est constituée au cours des années une couche importante de litière, la composition floristique présente une évolution cyclique. Pendant quelques années, les graminées C_4 à germination rapide dominent (*Diheteropogon hagerupii*, *Cenchrus biflorus*, etc.) et la litière se forme en abondance. Cette période est suivie par une année caractérisée par un grand nombre de dicotylédones à germination lente (*Merremia pinnata*, *Polycarpaea corymbosa*, *Ceratotheca sesamoides*, etc. ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 346-352). La prévention de la formation d'une couche de litière, ou son élimination avant les premières pluies, entraînera le plus souvent la persistance de la dominance des graminées C_4 à germination rapide. La pâture peut en être la cause tout comme les feux. C'est pourquoi pendant la période de travail sur le terrain à la fin de la saison sèche, il faut noter pour chaque site la quantité de litière, et sinon, indiquer si des feux ont eu lieu depuis la période des pluies. Si tous les sites choisis pendant la première période de travail sur le terrain se situent dans des zones non brûlées avec une quantité relativement importante de litière, la présence ou l'absence de litière à la fin de la saison des pluies peut aider à détecter les feux éventuels sur les sites après la première période de travail. Malgré les différences dues aux feux, les sites doivent être considérés comme autant de de la même unité. Après standardisation (II.3.6.4), ils peuvent être utilisés ensemble pour vérifier l'estimation théorique de la production (II.3.6.5). Ceci se fera à l'aide de la moyenne pondérée, car même en l'absence de pâture et de feux ce n'est que tous les 2 à 4 ans que la quantité de litière sera suffisante pour permettre la dominance d'espèces à germination lente.

Question 1d : Et si aucune réponse positive n'a pu être apportée aux questions précédentes ?

Il existe d'autres causes possibles aux différences de composition de la strate herbacée entre les sites d'une même unité. La variabilité dans l'espace de la pluviosité, et notamment le démarrage de la saison des pluies sont de ceux-là. Par ailleurs, un ou plusieurs sites peuvent se situer sur des jachères et les autres sur une végétation naturelle non perturbée.

Dans le premier cas, il faut par standardisation de tous les sites, obtenir une végétation représentative (schéma II.6). Il est cependant conseillé de décrire séparément les jachères, tout comme les terres surpâturées (question 1b).

Schéma II.6
Caractéristiques des plantes en relation avec les zones écologiques dans les pays sahéliens.

---

caractéristiques des plantes

type :	pérenne			annuelle		
germination :	-	rapide,	homogène	lente,	hétérogène	
photosynthèse :	C_4	C_4	C_4	C_4	C_4	C_3
forme de croissance :	gram.	gram.	dico.	gram.	dico.	dico.
Sahara :						
continental						
I > *P*	(+)			(+)	(+)	
maritime (l'Ouest)						
I = *P*				++	++	
I > *P*	+			++	++	
nord du Sahel :						
I < *P*		+	+	++	++	
I = *P*		++	+	+	+	
I > *P*	+	++	++	+	+	+
sud du Sahel :						
I < *P*		++	+	++	+	++
I = *P*	+	+++	+	++	+	+
I > *P*	++	++		+		+
savane soudanaise :						
I < *P*	+	++		++		++
I = *P*	++	++		+		+
I > *P*	+++	+		+		

gram. : graminée ; dico. : dicotylédone ; *I* : eau infiltrée ; *P* : pluviosité ;
(+) : présence locale ; + : important ; ++ : groupe co-dominant ; +++ : dominant.

Question 2 : Le taux des groupes d'espèces individuelles s'écarte-t-il de celui indiqué dans le schéma II.6, compte tenu de la région dans laquelle se situe l'unité de paysage, et de la relation entre la pluviosité et l'infiltration ?

Dans le cas d'une réponse négative, il faut passer à la question 3. Si la réponse est affirmative, il faut tout d'abord tenter de déceler la cause de l'écart en répondant aux questions 2a à 2c. Il est ainsi possible de déterminer si l'écart constaté est accidentel et s'il est lié à la dynamique pluriannuelle, ou encore s'il est temporaire ou permanent. Des indications seront fournies afin de réaliser à partir de la composition floristique d'une année quelconque, une image de la composition floristique moyenne escomptée, en puisant largement dans les connaissances de la dynamique de la strate herbacée (figure I.7 ; schémas II.7 et II.8 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 98-132 ; Cissé, 1986).

Question 2a : L'écart concerne-t-il des espèces pérennes ?

Après deux décennies de sécheresse et de surpâturage, le taux de graminées pérennes sera, dans la plupart des cas, inférieur à celui indiqué dans le schéma II.6. Depuis la fin des années 60, la frontière septentrionale de la zone d'expansion de *Andropogon gayanus* par exemple s'est déplacée du sud du Sahel vers la savane guinéenne.

Lorsqu'à la suite d'une bonne gestion (pas de surpâturage), il subsiste suffisamment d'individus de graminées pérennes pouvant par dissémination, après quelques années de bonne pluviosité, contribuer d'une façon significative à la production, l'écart a un caractère provisoire. Parallèlement à la production existante, il faudrait alors également calculer la production possible dans le cas de reprise des graminées pérennes (II.3.6.3).

Pour comparer la quantité mesurée avec l'estimation théorique de l'azote de la strate herbacée, il est bon de bien vérifier la récente disparition des graminées pérennes. Les indications en ce sens peuvent être directes, le champ recèle encore des restes de touffes, ou indirectes, la végétation observée présente un caractère fortement rudéral (Breman & Cissé, 1977 ; Leloup & Traoré, 1989).

> Lorsqu'il est question ici et ailleurs de graminées pérennes, les espèces plus petites telles *Sporobolus festivus* et *Leptothrium senegalense*, qui ne forment pas de biomasse importante, ne sont pas prises en considération. La dernière espèce citée peut même dominer localement la végétation dans le centre du nord du Sahel. Ces espèces semblent très résistantes à la sécheresse, peut-être justement à cause de leur faible production. Dans la description des végétations, elles sont classées avec les graminées C_4 annuelles à germination rapide.

Question 2b : Le taux des graminées C_4 à germination rapide est-il plus élevé qu'escompté ?

C'est la situation à laquelle il faut s'attendre, à la longue, aux endroits où les graminées pérennes ont été éliminées par la sécheresse (voir question 2a). Aux endroits où les espèces annuelles dominent naturellement, cette situation intervient après une saison de pluies favorable, notamment lorsque le démarrage a été régulier, mais toutefois sans pluies réellement fortes (schéma II.7). Les feux réguliers et une série d'années antérieures de bonne pluviosité renforcent cette évolution. Dans ce dernier cas, on peut s'attendre à un accroissement parallèle de la longueur du cycle (question 3), et à une élimination non seulement des espèces à germination lente, mais également, dans le Sahel proprement dit, des dicotylédones C_4, à cause de l'intensification de la concurrence pour la lumière (Spitters & Aerts, 1983).

On assiste alors à une modification temporaire de la composition floristique.

> Un cas particulier se présente dans le sud du Sahel, sur des sols argileux lourds avec ruissellement, presque exempt d'arbres, présentant des fentes de retrait pendant la saison sèche. La logique voudrait une dominance des espèces à germination lente (schéma II.6), mais nos observations ont fait apparaître que plus de 90 % de la biomasse était composée pendant quatre années consécutives, dont trois à faible pluviosité et démarrage irrégulier, de *Schoenefeldia gracilis*, une espèce à germination rapide.

Question 2c : Le taux des espèces à germination lente est-il beaucoup plus élevé que prévu ?

Deux causes peuvent intervenir : la formation de litière et un démarrage irrégulier de la saison des pluies, causes qui peuvent éventuellement se renforcer réciproquement. Elles sont liées à la dynamique pluriannuelle et l'écart en question est donc accidentel.

La présence de plus de 1000 kg/ha de restes de plantes des années précédentes est la meilleure preuve de la première cause. Cette situation se présente dans le sud du Sahel, sur des sols sablonneux à bonne infiltration. Il ressort de nos observations que 95 % de la biomasse de la strate herbacée peut être constituée d'espèces à germination lente (pour 1600 kg/ha de litière), alors qu'il s'agit en moyenne de 25 % (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 346-352). Ces situations sont également caractérisées par une faible densité de plantes, laquelle varie ailleurs généralement entre 200 et 2000 plantes par m².

Schéma II.7
Importance relative des plantules de 4 types d'espèces au début de la croissance végétative après 4 démarrages différents de l'hivernage.

vitesse de germination	rapide		lente	
résistance à la sécheresse	élevée	limitée	élevée	limitée
quelques petites pluies suivies de sécheresse	+	±	+++	+++
petites pluies sans grandes interruptions	+++	+++	+	+
une grande pluie suivie de sécheresse	+	±	++	+
des bonnes pluies font démarrer l'hivernage	+++	+++	++	++

+++ = dominance de la biomasse ; ++ = biomasse d'une certaine importance ; + = sans importance pour la biomasse ; ± = présence douteuse (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 106).

Un démarrage irrégulier de la saison des pluies, avec une ou plusieurs périodes de sécheresse, constitue une autre cause possible (schéma II.7). Une forte exploitation des pâturages pendant la germination et l'installation entraînent un effet analogue (schéma II.8;).

Dans les trois cas, la composition de la réserve de graines détermine la dominance des espèces : il peut être question d'une végétation riche en espèces différentes, mais sur des substrats à bonne infiltration, il se peut qu'une seule espèce domine fortement, telle que *Eragrostis tremula* , *Elionurus elegans*, *Borreria radiata*, *Alysicarpus ovalifolius* ou *Zornia glochidiata*.

L'écart peut, plus aisément que le précédent, se prolonger pendant plusieurs années, lorsqu'il résulte de la disparition d'une population de graminées pérennes en l'espace d'une ou de plusieurs années. Une sécheresse extrême ou un accroissement rapide de l'intensité de pâture pendant la période des pluies sont ici les causes probables. Les graminées à germination rapide domineront en fin de compte à de tels endroits (question 2b), mais au cours de la phase de transition de quelques années, nécessaire à la constitution d'une réserve suffisante de semences, il se peut que la végétation se compose pour une grande part d'espèces à germination lente.

Dans les situations où les espèces à germination lente dominent naturellement, il est toujours question d'une redistribution hétérogène de l'eau et parallèlement d'une répartition hétérogène des espèces, de la biomasse de la strate herbacée et du recouvrement ligneux. Dans aucun des cas mentionnés ici, l'accroissement du taux des espèces à germination lente ne va de pair avec un accroissement de l'hétérogénéité. Voilà un critère supplémentaire pour reconnaître la dominance d'espèces à germination lente en tant qu'écart de la moyenne.

Schéma II.8
Influence de la pâture sur la végétation en rapport avec le substrat et le moment de l'exploitation.

---

	substrat	moment d'exploitation	importance des espèces et leurs caractéristiques				
			ligneux	herbacées annuelles			
				germination	longueur de cycle	photosynthèse dominante	appétibilité
intensité d'exploitation							
non- ou peu exploité	-	-	espèces et importance liées à la pluviosité	rapide et homogène	aussi longue que possible vu la pluvio-sité moyenne	C_4	bonne
exploitation intensive	sable à bonne infiltration	hivernage	importance augmente ; épineux dominent	lente et hétérogène	courte	C_3	moindre

	saison sèche	importance des espèces appetées diminue	rapide et homogène	aussi longue que possible vu la pluvio-sité moyenne	C_4	bonne
sols à forma-tion de croûtes	hivernage	importance augmente beaucoup ;	lente et hétérogène	courte	C_3	moindre
	saison sèche	les épineux et espèces non-appétis-santes dominent	rapide et lente, homo-gène et hétérogène	en moyenne plus courte, mais fraction plus longue	C_3	bonne

---

Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 366 .

Les écarts (plus) permanents peuvent avoir deux causes : forte exploitation des pâturages et densité élevée des arbres. La sécheresse parmi d'autres causes, a fait qu'un taux de recouvrement ligneux dépassant largement 50 %, est devenu rare. Lorsque la disponibilité en eau est suffisamment importante pour permettre un tel taux de recouvrement, les graminées hautes à germination rapide sont remplacées par des dicotylédones à germination lente et photosynthèse C_3 (adaptation à l'ombre).

Lorsque l'exploitation des pâturages est (trop) lourde pendant de longues années (schéma II.5), les espèces à germination lente et/ou hétérogène domineront davantage qu'en présence d'une faible exploitation (schéma II.8). C'est sur les sols sensibles à l'encroûtement, que le point critique en charge de bétail est atteint le plus rapidement.

> Parmi les espèces qui dominent en présence d'une forte exploitation des pâturages, la légumineuse *Zornia glochidiata* occupe une place particulière à cause de sa germination très hétérogène. Elle profite de l'encroûtement de la surface du sol, allant de pair avec un ruissellement accru. Dans le cas d'un ruissellement de 50 %, il se peut que cette espèce constitue 10 à 90 % de la biomasse (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 298). La position concurrentielle de cette espèce, mais également celle des autres légumineuses, est renforcée aux endroits enrichis par l'azote, pour cause de transport centripète de fumier en direction du village ou du point d'abreuvement. Lorsque sous l'influence d'une forte exploitation des pâturages, les légumineuses se développent aux endroits à ruissellement, le rapport P/N de toute la strate herbacée à la fin de la saison de croissance, sera supérieur à 0,1 ; aux endroits à concentration des

écoulements, il sera alors de 0,05 à 0,06.

Question 3 : La durée de la phase végétative des espèces dominantes correspond-elle à la durée escomptée compte tenu de la pluviosité moyenne et du substrat ?

Il n'est pas possible d'apporter une réponse simple à la question de savoir quelle est la durée moyenne escomptée de la phase végétative (période de la germination jusqu'à la floraison) pour une combinaison donnée de pluviosité et de substrat. Le nombre maximum de jours pendant lesquels l'eau est disponible pour la croissance, peut être estimé en multipliant la quantité d'eau infiltrée (*I* en mm) par 0,13. Mais la strate herbacée n'exploite pas pleinement cette période, la preuve en est qu'à la fin de la saison de croissance, 20 % de la quantité des pluies annuelles subsiste encore en moyenne dans le sol. Par ailleurs, la phase végétative se termine des jours, voire des semaines avant la fin de la période de croissance. La durée « moyenne » véritable de la phase végétative est donc plus courte que la longueur calculée de la saison de croissance.

La durée pour une année quelconque, est déterminée par le moment de la germination, par la réaction propre à chaque espèce par rapport à la photopériode et par l'influence des périodes de sécheresse pendant la phase d'installation sur cette réaction. Lors de l'évaluation d'une région étendue, il est impossible de déterminer sur le terrain le moment où la phase végétative se termine. Par contre, le moment où interviennent la germination et le démarrage de la phase de croissance, peut être déduit globalement à partir de la pluviosité de l'année d'observation. Ainsi, il est possible d'estimer la fin de la phase végétative, compte tenu de la réaction propre à l'espèce sur la photopériode (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 116-118 ; tableau IV.3).

Une approche parallèle consiste à comparer la dispersion observée des espèces dominantes, avec l'image basée sur la synthèse d'observations à long terme. Les tableaux concernant la « Répartition des principales espèces » de l'IEMVT (Boudet, 1978) sont le mieux adaptés pour ce faire. Les observations sur le terrain, sur lesquelles sont basés les tableaux, datent d'avant 1970. Aussi, il est possible que les habitats des diverses espèces s'étendent davantage vers le nord et ce, au-delà de la moyenne, compte tenu de la bonne pluviosité des années 50 et 60. Nos propres observations datent de la seconde moitié des années 70 et ne peuvent donc non plus garantir une grande précision ; à cette époque les espèces se sont déplacées vers le sud (processus 4c, figure I.7). Le nombre d'observations est d'ailleurs beaucoup plus limité que celui de l'IEMVT.

Pour répondre à la question 3, il faut tout d'abord classifier la végétation des diverses unités selon le schéma II.9;. Il suffira d'effectuer cette classification pour des unités représentatives bien dispersées, car les processus 4a et 4c (figure I.7) s'effectueront sur une large plage de la région à évaluer. Les unités convenant le mieux sont celles où dominent les graminées annuelles à germination rapide ou les graminées pérennes. On évite ainsi l'interférence d'autres perturbations (pâture intensive, mauvais démarrage de la saison, litière et mort par sécheresse). Il s'agit donc d'une comparaison de l'étalement observé et calculé des communautés 1, 3, 5 et 6 (schéma II.9). Sur les sols où l'infiltration est de bonne à convenable, ces communautés se succèdent du nord vers le sud en se chevauchant.

Schéma II.9
Classification hiérarchique des communautés d'espèces qui dominent la biomasse de la strate herbacée, aux 3 niveaux de précision (a, b et c), suivant la méthode de Noy-Meir (1971) ; les communautés ont été représentées au tableau par leurs espèces[1)] dominantes et co-dominantes.

a		b		c		autres espèces de reconnaissance
no.	dom. + co-dom.	no.	dom. + co-dom.	no.	dom. + co-dom.	
		1.1	Tra ber	1.1.0	Tra ber + Tri ter	
		1.2	Lep sen	1.2.0	Lep sen + Por ole	Chl pri, Gyn gyn
1	Cen bif[2)] + Aly ova	1.0	Cen bif +Aly ova	1.0.1 1.0.0 1.0.2	Ari mut[2)] Cen bif + Aly ova Era tre + Eli ele	
2	Zor glo	2.0	Zor glo	2.0.0 2.0.1	Zor glo Dac aeg	
3	Sch gra[2)]	3.0	Sch gra	3.0.0 3.0.1	Sch gra Pan lae	Ari fun, Sch exi Ech col
4	+ Bor rad Ble lin + Bor sta + Bor cha	4.0 4.1	+ bor rad Ble lin bor sta + Eli ele + Bor cha + Lou tog	4.0.0 4.1.0	+ Bor rad Ble lin Bor sta + Ele ele + Bor cha	
5	+ Lou tog[2)] + Pen ped[2)] Dih hag[2)] + And pse[2)]	5.1 5.0 5.2	+ Eli Pen ped Dih hag And pse	5.1.1 5.1.0 5.0.0 5.2.0	Lou tog Pen ped Dih hag And pse	
6	And gay[3)]	6.0	And gay	6.0.0	And gay	

[1)] voir tableau IV.1 pour les noms complets des espèces ;
[2)] graminées à germination rapide ;
[3)] graminée pérenne ; communauté ajoutée, vu son importance dans un passé récent ;
Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 340 .

Lorsque l'étalement observé dans la région à estimer ne correspond pas à l'étalement représenté dans le

schéma II.10;, une sécurité supplémentaire peut être fournie par la pluviosité des années précédentes dans la région concernée. Dans le cas de sécheresse, comme par exemple au cours des deux dernières décennies, les communautés se déplacent vers le sud (figure I.7, processus 4c). En comparant l'emplacement des isohyètes sur la base de la pluviosité des 10 à 15 dernières années, avec ceux de la moyenne à plus long terme, il est possible d'indiquer sur quelles distances les communautés se déplacent.

Schéma II.10
Probabilité de dominance des espèces des 6 communautés principales dans la biomasse de la strate herbacée pendant une année quelconque par zone climatique en rapport avec le substrat, sans surexploitation.

	pluviosité moyenne (mm)									
	nord de la savane			sud du Sahel			nord du Sahel			
	I =	<	>	=	<	>	=	<	>	*P*
Cenchrus biflorus + *Alysicarpus ovalifolius*	-	-	-	++	-	-	+++	+	-	
Zornia glochidiata	-	++	-	-	++	-	-	++	-	
Schoenefeldia gracilis	+	+	-	++	++	++	-	+	++	
Blepharis linariifolia + *Borreria spp.*	-	++	-	+	++	+	-	+	-	
Diheteropogon hagerupii + *codominantes*	+++	+	+++	+	+	++	-	-	-	
Andropogon Gayanus	+	+	++	-	-	-	-	-	-	

- = chance négligeable ; +, ++ et +++ = respectivement faible, grande et forte probabilité ; *I* = infiltration ; *P* = pluviosité. Les communautés sont représentées par leurs espèces dominantes, voir schéma II.9 ; situation 2ème moitié des années '70 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 341.

Une plus grande précision est en principe possible, à condition de considérer aussi les communautés 2 et 4. Les espèces dominantes de ces communautés peuvent apparaître dans les communautés 1, 3, 5 et 6 sans pour autant être dominantes. Les communautés 2 et 4 dominent dans le cas de perturbations et sur des sols à infiltration hétérogène.

Une analyse plus en profondeur des communautés exigera, d'une part, une subdivision plus poussée en fonction de la pluviosité moyenne (la durée de croissance de *Diheteropogon hagerupii* est plus courte que celle de *Andropogon pseudapricus*, et globalement son habitat est situé plus au nord), et d'autre part, une subdivision plus poussée en fonction des stations végétales : endroits ombragés (*Pennisetum pedicellatum*), sols peu profonds (*Loudetia togoensis*) et endroits humides combinés avec des sols plus lourds (*Panicum laetum*). Ces espèces fournissent également peu d'informations concernant la question

3, car la disponibilité en eau à l'endroit de leur emplacement n'est pas directement déterminée par la pluviosité.

Une nouvelle subdivision permettra également de distinguer une communauté avec *Tribulus terrestris* et *Portulaca oleracea*, espèces qui sont révélatrices de perturbations. Si cette communauté n'apparaît que lors d'une subdivision poussée, cela tient au nombre d'échantillons sur lequel est basé la subdivision en communautés : un nombre d'échantillons plus important dans le nord du Sahel aurait permis de distinguer cette communauté au premier niveau, parallèlement à 2 et 4.

Cenchrus biflorus, une espèce plus rudérale, s'étend sur une région plus large et peut être observée jusque loin dans le sud, sur des jachères. C'est pourquoi les jeunes jachères ne conviennent pas, pour répondre à la question 3, surtout lorsqu'elles sont sablonneuses.

II.3.6.3. Recalcul éventuel de N_b

Les observations effectuées pendant la seconde période de travail sur le terrain peuvent donner lieu à un réajustement des paramètres *I* et f estimés précédemment pour l'équation N_b (schéma II.3b). Les estimations ne sont pas très précises, mais dans le cadre de cette évaluation semi-détaillée, il n'est pas possible de procéder soi-même à la prise de mesures. Dans le cas de *I*, cela exigerait beaucoup trop de temps ; f est une valeur moyenne des 10 à 20 années précédentes (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 280-283).

Question 4 : Y a-t-il des arguments en faveur d'une correction de la valeur estimée de I ?

Le plus grand risque d'une fausse évaluation de *I* peut intervenir sur des sols à ruissellement (R), lorsque l'exploitation, les feux ou les termites font disparaître en grande partie la strate herbacée pendant la saison sèche, alors que le peuplement des espèces ligneuses est quasi absent et ne permet pas d'évaluer le taux de surpâturage (mort due à la sécheresse, défrichage, coupe). La dégradation de la végétation et du sol due au surpâturage peut augmenter le ruissellement ; une utilisation directe du tableau I.1 conduit alors à une sous-évaluation de R, et donc à une surévaluation de *I*. Il est également possible que l'intensité des pluies de l'année de l'évaluation s'écarte fortement de l'intensité moyenne ; dans ce cas le ruissellement présentera des écarts (III.2.4).

Les arguments en faveur d'une correction de *I* résultent donc de l'analyse de la pluviométrie et de la confrontation entre le total des observations sur la végétation et le tableau II.14, qui sert lors de l'évaluation du ruissellement. Ce tableau est basé sur les observations de trois années, effectuées principalement dans la zone du Sahel.

Tableau II.14
Indices de l'importance du ruissellement, lié à la physionomie de la végétation à des sites représentatifs à l'intérieur d'une unité de paysage.

	R ~ 0,3	R ~ 0,6
nombre d'espèces		
- strate herbacée [1)]	20(10-30)	7(3-15)
- espèces ligneuses [2)]	13(5-20)	7(3-10)
biomasse des espèces à germination rapide ou très hétérogène(%)[3)]	50	60
homogénéité		
- biomasse de la strate herbacée (%)[4)]	70	125
- recouvrement espèces ligneuses[5)]	0,5(0,8-0,3)	0,1(0,5-0,05)

R = coefficient de ruissellement, exprimé en tant que fraction de la pluviosité ;
1) valeurs moyennes et extrêmes pour un échantillonnage de 30x1 m^2 à R = 0,3 ; et pour 40 m^2 à R = 0,6, pour des espèces constituant au moins 1% de la biomasse ;
2) valeurs moyennes et extrêmes en nombre par hectare, pour un échantillonnage d'un hectare ;
3) contribution à la biomasse de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance ;
4) écart type en tant que pourcentage de la moyenne ;
5) recouvrement d'une unité de paysage, divisé par la moyenne pondérée du recouvrement de l'aire en question et le recouvrement de l'unité de paysage, qui bénéficie d'eau de ruissellement ; les aires à ruissellement et à concentration des écoulements peuvent également constituer des sous-unités au lieu d'unités individuelles.

A cause de la forte dynamique pluriannuelle, les valeurs absolues des moyennes du tableau ont peu d'importance, surtout pour les indices concernant la strate herbacée. Les différences intrinsèques entre les situations étudiées doivent être prises en considération. Dans le cas de trois divergences univoques (ou davantage), plus ou moins identiques sur trois sites (ou plus) par unité, il faut réajuster *I* sur la base d'une valeur de R s'écartant de la valeur escomptée. Le réajustement de R (et donc de *I*) se fera alors conformément à l'importance et à la tendance des écarts.

Le seul nombre d'espèces ne constitue pas un critère suffisant pour le ruissellement. Il est vrai que les moyennes des deux situations choisies diffèrent, mais l'étalement engendre un chevauchement important et le nombre d'espèces ne diminue pas uniquement pour des valeur R > 0,3, mais également lorsque R < 0,3.

La contribution des plantules lentes et hétérogènes à la production annuelle de la strate herbacée, constitue une indication pour le ruissellement, tant que la production annuelle est inférieure à environ 2 t/ha de matière sèche. Ceci sera en général le cas pour R > 0,3, c'est-à-dire pour des valeurs dans le trajet, pour lesquelles le risque d'estimations fausses est le plus grand.

Lorsque le ruissellement croît, l'hétérogénéité de la disponibilité en eau augmente entraînant une augmentation de l'hétérogénéité de la distribution des espèces, de la biomasse et de la production. Le

tableau II.14 donne la valeur globale de l'écart type par rapport à la production annuelle de la strate herbacée, exprimée en pourcentage de la moyenne. Il faut être conscient que les données indiquées sont dépendantes de la biomasse. Elles augmentent avec moins de 350 mm de pluie environ : lorsque la biomasse décroît de 1,5 à 0,5 t/ha de matière sèche, les écarts type présentés augmentent d'environ 35 % (en valeur absolue) (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 34). Si la quantité d'eau infiltrée malgré le ruissellement est telle que la production annuelle passe à $\geq$ 2 t/ha, l'écart type s'approche de 35 % indépendamment du degré de ruissellement ; vers le sud, l'effet du ruissellement sur l'hétérogénéité diminue donc lentement.

Pendant les années très sèches, il faut veiller à ne pas mélanger les effets de la sécheresse sur le nombre des espèces, sur l'importance des espèces à germination lente et sur l'hétérogénéité de la biomasse de la strate herbacée, avec le ruissellement accru lié à la dégradation. Le risque de surévaluer le ruissellement dû à l'utilisation du tableau II.14 est réel, notamment pour les sols plus lourds.

Le recouvrement ligneux est codéterminé par la quantité d'eau qui percole jusqu'au bas de la portée des racines de la strate herbacée. C'est pourquoi une augmentation de la pluviosité entraîne un accroissement du recouvrement beaucoup plus intense sur les unités à redistribution d'eau par ruissellement et par concentration des écoulements, que sur les unités à infiltration homogène. Cet accroissement du recouvrement moyen entraîne également une différence accrue du recouvrement entre les unités (ou parties des unités) avec ruissellement, et celles avec concentration des écoulements (photo II.4). Ce phénomène est représenté dans le tableau II.14, où le recouvrement est exprimé comme le quotient :
- du recouvrement de l'aire avec ruissellement dont le R est vérifié (unité ou partie d'une unité) ;
- de la moyenne pondérée (sur la base des superficies) de ce recouvrement et de celui des aires recueillant l'eau de ruissellement.

Dans ce dernier cas, les aires avec concentration des écoulements, qui recueillent l'eau de ruissellement de l'aire pour laquelle le coefficient de ruissellement est vérifié, sont donc prises en considération. Il peut s'agir de parties de la même unité ou d'unités voisines.

Question 5 : Y a-t-il des arguments en faveur d'une correction de la valeur estimée de f ?

Dans la situation actuelle, il y a trois raisons envisageables pour réajuster la valeur de f.

Les observations à la fin de la saison des pluies ont pu faire apparaître que les graminées pérennes sont plus importantes que ne le laissait supposer les observations de la saison sèche. A l'aide du taux de recouvrement par les graminées pérennes déterminé sur le terrain, il est possible de calculer une valeur corrigée de f (équation II.17).

Deuxièmement, le caractère rudéral de la végétation ainsi que d'autres indications peuvent faire apparaître que la végétation était dominée, il y a peu de temps, par des graminées pérennes et/ou qu'elle présentait un recouvrement ligneux important. Il existe alors encore une réserve d'azote dans le sol qui, du point de vue de sa quantité et de sa nature, correspond à une valeur f plus faible, compte tenu de la

recirculation interne des éléments nutritifs dans les espèces pérennes. Bien qu'à l'avenir il faudra tenir compte d'une valeur plus élevée de f, il faut encore utiliser l'ancienne valeur pour la vérification de N_b sur la base des mesures effectuées.

Finalement la composition floristique observée peut laisser supposer que la pression d'exploitation sur une unité (et donc la valeur f) divergera de la moyenne dans une région donnée. Lorsque la végétation est par exemple dominée par *Echinochloa spp*., on peut supposer que la fraction exploitable sera plus élevée que la moyenne, car la digestibilité de ces espèces est très élevée, même pour des plantes en fin de cycle à l'état sec. Inversement, pour une végétation dominée par des espèces non appétibles telles que, par exemple, *Cassia tora* , la fraction exploitable sera loin en-dessous de la moyenne.

II.3.6.4. Standardisation du rendement d'azote mesuré (N_m)

Afin de pouvoir utiliser l'azote observé une année quelconque pour vérifier le N_b évalué théoriquement, il faut convertir les valeur observées (N_m) en fonction des conditions valables pour la théorie (schéma II.3c). La standardisation des valeurs observées est plus efficace que le réajustement de l'évaluation théorique, car cette dernière tente de définir la situation « normale » , « moyenne » avec un champ d'application plus général.

« L'année standard » valable pour la théorie, est une année avec une pluviosité moyenne du point de vue de la quantité et de la distribution, pour l'unité en question. La composition floristique correspond à la moyenne pondérée des unités (schéma II.6), étant entendu qu'on suppose que la contribution des légumineuses à la production annuelle est de 5 %. Pour des écarts dans l'année d'observation, par rapport à la pluviosité et à la contribution des légumineuses, une procédure de standardisation est décrite ci-dessous. Le schéma II.11; présente les observations et données principales nécessaires. D'autres causes pouvant expliquer les divergences possibles entre N_m et N_b n'ont pas été suffisamment étudiées pour les intégrer dans la procédure de standardisation. Ces causes sont signalées, pour les inclure lors d'un écart éventuel entre N_b et N_m, dans la décision à prendre pour déterminer laquelle des deux est plus caractéristique de la situation moyenne des pâturages (II.3.6.5).

Schéma II.11
Récapitulation des données et observations principales utilisées lors de la standardisation du rendement mesuré d'azote (N_m), compte tenu de la contribution des légumineuses à la biomasse aérienne de la strate herbacée et de la pluviosité.

N_m ---> N_i (question 6)

N_i ---> N_s (question 7)

partie aérienne de la strate herbacée		
- biomasse totale	x	x
- biomasse des légumineuses	x	
- taux N total	x	x
légumineuses	x	
- taux P total	x	
sol		
- taux de sable		x
- capacité d'infiltration		x
climat		
- pluviosité moyenne		x
- pluviosité réelle		x

Question 6 : La contribution des légumineuses à la biomasse de la strate herbacée n'équivaut-elle pas à 5 %, à la fin de saison de croissance ?

Lorsque le taux de légumineuses est égal à 5 %, il faut passer à la question 7 : N_m est alors égal à N_i.

Tout l'azote des légumineuses ne provient pas de la fixation dans les nodules par *Rhizobia* : une part variable est extraite du sol. Dans l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 301), la part obtenue par fixation est estimée à 75 %. Lorsque I est < 250 mm/an et que l'eau joue un rôle plus limitatif que les éléments nutritifs, cette part est estimée à 65 % ; aux endroits où les légumineuses contribuent en permanence pour plus de 10 % de la production annuelle, cette valeur n'est que de 50 %. Ces valeurs peuvent servir à standardiser le rendement mesuré d'azote (N_m) d'une végétation où la contribution des légumineuses est plus petite ou plus grande de 5 %. La valeur révisée de N_m est appelée le rendement intermédiaire d'azote (N_i), car la standardisation en fonction de la pluviométrie doit encore avoir lieu. L'équation à utiliser est la suivante :

$$N_i = N_m - (L/100-0{,}05) \times B \times [N]_l \times (c/100) \times 10^{-3}, \text{ ou}$$

$$N_i = N_m - 10^{-5} (L/100-0{,}05) \times B \times [N]_l \times c \qquad \text{(équation II.18)}$$

dans laquelle :
L = contribution des légumineuses à la biomasse de la strate herbacée (%) ;
B = biomasse de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance (kg/ha) ;

$[N]_l$ = taux d'azote des légumineuses (g/kg) ;

c = part d'azote fixée dans les légumineuses (50, 65 ou 75 % ; voir ci-dessus).

Lorsque l'unité concernée ne comporte pas de légumineuses, ou en l'absence d'analyses, il faut se baser sur le taux d'azote des légumineuses ($[N]_l$) d'une unité approchant au mieux du substrat, de la pluviosité et des espèces de légumineuses dominantes. Il est également possible d'avoir recours à la valeur moyenne donnée par Penning de Vries & Djitèye (1982, p. 322) : 40 g/kg pour une biomasse totale de la strate herbacée de moins de 100 kg/ha de matière sèche, et jusqu'à 20 g/kg pour une biomasse totale de 1750 kg/ha ou plus.

La contribution des légumineuses au rendement totale d'azote dépend également des pluies ; c'est pourquoi il faut procéder à la correction ci-dessus, avant d'effectuer la correction relative à la pluviosité de l'année d'observation.

> Dans la question 2b, l'exemple cité concerne une plaine argileuse ouverte, située dans le sud du Sahel, dont la végétation se composait pendant les années d'observation de plus de 90 % de *Schoenefeldia gracilis*. Le reste de la biomasse se composait de *Panicum laetum*. La contribution des légumineuses à la biomasse était donc nulle. En 1978, la production de la strate herbacée était de 1360 kg/ha, avec un taux d'azote moyen de 10,8 g/kg (N_m = 14,7 kg/ha) et I > 250 mm. N_i est alors 14,7 - (0 - 0,05) × 1360 × 20 × 0,75 × 10^{-3} = 15,7 kg/ha, soit une augmentation de N_m de 1 kg/ha.
>
> La correction à apporter à N_m sera plus importante aux endroits où les légumineuses représentent en permanence plus de 10 % de la production de la biomasse, malgré une valeur de c = 50 %. C'est ainsi que sur un substrat limono-sablonneux situé près d'un point d'abreuvement, avec une moyenne de pluviosité de 580 mm/an, la contribution de légumineuses (notamment *Zornia glochidiata*) variait sur une période de cinq ans entre 13 et 49 %. N_m était en moyenne de 20,9 kg/ha, et N_i était en moyenne inférieur de 4,4 kg/ha (valeurs extrêmes 2,2-7,3 kg/ha).

Question 7 : La quantité et/ou la répartition de la pluviosité s'écarte-t-elle de la moyenne ?

Lorsque, il n'y a pas d'écart, passer à la question 9 : N_i est alors égal à N_s. Dans la plupart des cas, tout comme pour la part des légumineuses, il y aura cependant une différence.

Puisque la disponibilité en azote et l'absorption d'azote sont codéterminés par la disponibilité en eau, il faut quantifier sur N_i l'effet des écarts éventuel par rapport à la pluviosité moyenne, de façon à pouvoir également standardiser N_m à cet égard. La décomposition de la matière organique et la minéralisation d'azote organique qui va de pair, est dépendante de l'état d'humidité du sol, car ces processus n'ont lieu que s'il fait humide. La quantité totale d'azote minéralisé variera en fonction de la durée et de la profondeur de l'humidification du profil du sol. Par ailleurs, cette quantité dépend du taux de matière organique. Puisque celui-ci diminue dans le profil, l'effet d'humidification doit diminuer au fur et à mesure de la profondeur.

L'estimation théorique de N_b est basée sur la pluviosité annuelle moyenne du point de vue de la quantité et de la distribution. Ceci va de pair avec un *I* déterminé et donc pour une profondeur donnée d'humidification du profil du sol. La profondeur d'humidification pendant l'année d'observation dépend fortement de *I* , qui est déterminé tout autant par l'importance des pluies et de leur distribution (III.2.3) et de l'intensité des pluies (II.2.4) que par la pluviosité totale. Lorsque au cours de l'année d'observation, *I* est plus élevé que la moyenne, le sol s'humidifiera plus en profondeur, et inversement. Le dernier cas aura un plus grand effet sur N_m que le premier, compte tenu de la répartition de la matière organique dans le sol. La figure II.7 illustre le rapport entre la profondeur de l'humidification du profil et l'azote dans la biomasse aérienne, exprimé en tant que fraction du N_b moyen (voir également III.2.3).

La profondeur de l'humidification dépend, outre de *I*, de la texture du sol ; elle peut être calculée à l'aide des équations II.5 et II.6.

Ce calcul peut être effectué aussi bien pour la moyenne que pour l'année de prise de mesure. Ensuite, les fractions correspondantes aux profondeurs d'humidification peuvent être obtenues à partir de la figure II.7. A présent, il est possible de calculer la valeur standardisée pour l'absorption d'azote (N_s) en kg/ha selon l'équation :

$$N_s = F_{50}/F_{am} \times N_i \qquad \text{(équation II.19)}$$

F_{50} représente ici la fraction concernant la profondeur d'humidification pendant une année moyenne et F_{am} la fraction correspondant à la profondeur d'humidification dans l'année de la prise de mesure. L'équation II.9 déjà utilisée constitue une forme particulière de cette équation.

L'équation II.19 ne doit être utilisée que lorsque pendant l'année de prise de mesure $I \geq 120$ mm. Puisque *I* est estimé et non calculé, l'utilisation de l'équation risque d'entraîner des corrections disproportionnées, lorsque la profondeur d'humidification du sol est limitée. C'est pourquoi l'équation ci-dessous est proposée pour les situations ou $I < 120$ mm.

$$N_s = N_i + (F_{50} - F_{am}) \times 15 \qquad \text{(équation II.20)}$$

La valeur 15 est ici égale à la valeur moyenne du plateau que N atteint dans la figure II.7 pour une profondeur d'humidification du profil de 200 cm (figure II.14 ; figure III.9). La présente correction est en principe moins précise que celle effectuée à l'aide de l'équation II.19, car les différences de disponibilité en azote entre les sols (hauteur du plateau) n'est pas prise en considération. Le risque d'introduction de fautes, par une estimation imprécise de *I*, est cependant réduit.

Le grand désavantage de l'approche esquissée est que l'effet de l'écart de la grandeur des pluies et de la

répartition de leurs valeurs moyennes n'est pas répercuté dans la profondeur d'humidification. Pourtant, il faut sur les sols plus légers notamment, tenir compte de la possibilité que la répartition des pluies soit responsable de la variation dans N_m. Avec le modèle à la base de l'équation pour le calcul de la profondeur d'humidification pr_h(équation II.6), la répartition des pluies peut être prise en ligne de compte (III.2.3), tel qu'il ressort de l'exemple ci-après.

Pour la pratique, ce modèle est cependant trop compliqué. La standardisation du rendement mesuré d'azote doit pour cette raison se limiter à la seule prise en compte de la quantité de pluie. Le choix de N_b ou de N_s pour caractériser un pâturage, doit tenir compte de la répartition des pluies (II.3.6.5).

L'influence de la répartition des pluies sur le rendement d'azote et la possibilité d'évaluer celle-ci à l'aide d'un modèle de simulation, est illustrée à l'aide d'un pâturage sur sable limoneux avec une pluviosité moyenne annuelle de 450 mm. Le taux de sable est de 83 %, ce qui entraîne un taux d'humidité à la capacité au champ de 0,11 cm^3/cm^3.

De 1976 à 1979 compris, la pluviosité totale était respectivement de 350, 200, 400 et 300 mm ; pour un coefficient de ruissellement de 0,25, la profondeur d'humidification (pr_h) est, selon l'équation II.5, de respectivement 100, 42, 119 et 80 cm. Lorsque la répartition des pluies est également prise en compte, comme dans le modèle de simulation (III.2), on obtient 80, 45, 125 et 40 cm. En 1979 et dans une moindre mesure en 1976, la non-observation de la répartition des pluies a entraîné une surestimation de la profondeur d'humidification. La figure II.15 montre qu'au cours de ces deux années, la pluviosité avait été très irrégulière : une longue période de relative sécheresse séparait deux périodes relativement humides (pluviosité supérieure à l'évapotranspiration potentielle). Les valeurs pour N_i sont 15,0 - 6,0 - 20,5 et 7,7 kg/ha pour quatre années consécutives. Ces valeurs concordent davantage avec la profondeur calculée d'humidification compte tenu de la quantité et de la répartition de la pluviosité, qu'avec la quantité seule (figure II.14).

Figure II.14
Le rendement d'azote (standardisé pour les légumineuses ; N_i) sur un site sablo-limoneux pendant quatre années sèches consécutives en tant que fonction de la profondeur de l'humidification. La profondeur d'humidification est calculée en tenant compte (x) et en ne tenant pas compte (o) de la répartition des pluies au cours des années concernées.

Figure II.15
I du site 16 par décade, sur quatre années consécutives, et évapotranspiration potentielle moyenne.

II.3.6.5. Choix entre N_b et N_s

Une comparaison entre la valeur N_b théorique - telle que calculée dans II.3.4 et II.3.6.4 (lorsque *I* ou la valeur f y sont corrigées) - et N_s, doit entraîner un choix, à savoir lequel des deux sera utilisé comme base pour la production et l'estimation de la capacité de charge (schéma II.3d). Lorsque N_s ne diverge

pas ou à peine de N_b, on utilise N_b pour l'estimation de la capacité de charge et de la potentialité des pâturages en termes de production animale. Dans le cas de différence entre N_b et N_s, il faut tout d'abord répondre à la question de savoir si cette différence s'explique par la situation spécifique de l'année d'observation. Dans le cas d'une réponse affirmative, il s'agit d'une différence accidentelle et le choix portera sur N_b. Sinon il faut vérifier si la divergence est de caractère temporaire ou permanente. Le éma II.12; résume les observations et les données les plus importantes à ce sujet.

Schéma II.12;
Récapitulation des données et observations principales jouant un rôle pour permettre l'identification et l'interprétation des écarts supposés, accidentels, temporaires et (semi)-permanents entre N_s et N_b .

	écart supposé accidentel	écart temporaire ou (semi-)permanent	
		$N_s<N_b$	$N_s>N_b$
composition floristique			
- importance des espèces à germination rapide, à croissance après le début de la floraison ou non	x		
- dominance des espèces herbacées et leur durée de cycle		x	x
- importance des graminées pérennes		x	x
taux d'humidité de la strate herbacée	x		
recouvrement espèces ligneuses			
- embroussaillement		x	
- coupe			x
pâture		x	x
sol			
- appauvrissement		x	
- dégradation		x	
- enrichissement			x
climat			
- répartition de la pluviosité	x		
- histoire de la pluviosité	x		

Viennent encore s'ajouter quelques remarques concernant des situations où l'utilisation de la méthode décrite, entraîne la nécessité de procéder à un examen critique.

Question 8 : Y a-t-il divergence entre N_s et N_b ?

Compte tenu du nombre limité de relevés par unité et de la précision des mesures, il n'est pas possible d'effectuer une analyse statistique pour juger du caractère significatif de la différence entre N_s et N_b . C'est pourquoi le choix a porté sur une approche plus pragmatique.

Tout d'abord, il faut calculer la valeur moyenne de *N* s (trois sites ou plus par unité) et la comparer avec *N*b. Lorsque ces valeurs sont égales, le travail peut se poursuivre avec la valeur de N_b. Dans la plupart des cas, ces valeurs divergeront, et la comparaison se fera entre les valeurs individuelles de N_s pour une unité, et N_b. Ce n'est que lorsque toutes les observations individuelles sont plus élevées ou plus basses que la valeur de N_b, la différence est considérée comme significative. Dans tous les autres cas, la différence n'est pas considérée comme suffisamment importante et le travail se poursuivra avec N_b.

Lorsque une différence est constatée, il faut tout d'abord vérifier s'il s'agit là d'une apparence ou d'un incident. Dans ce cas, l'évaluation est quand même poursuivie à l'aide de N_b.

Question 8a : Y a-t-il déjà eu avant l'échantillonnage à la fin de la période des pluies des pertes de biomasse ou d'azote ?

On suppose que les pertes dues à la pâture ont été évitées, ou que la mesure de la biomasse en a tenu compte. Il en va de même pour la chute des graines. De plus, il existe un risque de perte d'azote par suite de pourrissement et de volatilisation, notamment dans le cas de pluies tardives sur une végétation parvenue (en grande partie) à maturité et morte. Les végétations pour lesquelles la strate herbacée, lors de l'échantillonnage, recèlent moins de 50 % d'eau, et qui après leur mûrissement (découlant des profils de pluviosité et de la date de mûrissement des ou de l'espèce dominante) ont encore bénéficié de 75 mm de pluie ou plus, ont révélé un rendement d'azote inférieur en moyenne de 30 % aux végétations qui étaient encore vertes et/ou qui n'avaient pas ou moins bénéficié de pluies après le mûrissement.

Lorsque la différence peut être expliquée par des pluies tardives, le travail se poursuit avec N_b.

Question 8b : La différence entre N_s et N_b est-elle occasionnée par une répartition spécifique des pluies ?

A la fin de II.3.6.4, il a déjà été mentionné que, notamment sur les sols plus légers, la répartition des

pluies peut influencer N_s par l'intermédiaire de la profondeur d'humidification. Pour vérifier si c'est le cas, il faut contrôler le nombre, l'importance et l'intensité des pluies individuelles et leur répartition dans le temps. La possibilité d'un écart de l'intensité par rapport à la moyenne a déjà été vérifiée à l'occasion de la question 4 dans II.3.6.3, car cet écart peut entraîner un autre ruissellement (R) et donc une autre infiltration (*I*). Pourtant la valeur totale de *I*, calculée de façon simple (équation II.1), peut être identique au cours de plusieurs années, alors que la profondeur d'humidification du sol diffère à cause des différences dans le rapport transpiration / évaporation du sol (III.2.3). Pour juger de l'effet de la répartition des fréquences de l'importance des pluies, il est conseillé de comparer la répartition des pluies de l'année d'observation avec les données du tableau III.15 : N_s sera relativement faible lorsque le taux des petites pluies (catégorie de 0 à 10 mm) est important, et donc le total du nombre des pluies.

L'inverse ne se vérifie pas, et certainement pas pour la zone des savanes. La valeur N_s sera la plus élevée lorsque les pluies sont telles qu'elles humidifient le profil une ou plusieurs fois jusqu'à 2 m de profondeur, sans qu'il y ait pertes par percolation. La figure III.13 permet de constater pour quelle valeur de *I* ceci se produit, dans le cas d'une répartition moyenne des pluies pour différentes valeurs de taux d'humidité à la capacité au champ. Pour des sols avec un taux d'humidité à la capacité au champ de, par exemple, 0,05, 0,25 et 0,45 cm³/cm³, il faut un *I* de respectivement 280, 875 et 1480 mm. En principe seul 100, 500 et 900 mm sont nécessaires pour humidifier le profil jusqu'au taux à la capacité au champ à condition que cette quantité s'infiltre en une fois. Ceci peut être provoqué par des averses, des concentrations de pluies ou des concentrations des écoulements.

L'analyse les pluies observées peut être facilitée par une représentation graphique après correction pour le ruissellement moyen par décade, en combinaison avec la moitié de la valeur de l'évapotranspiration potentielle (*ETP*). Pour déterminer la période comportant le maximum de réserve d'eau dans le sol, il faut diminuer *I* de 0,5 x *ETP* par décade ; lorsque la valeur est positive, il faut l'ajouter au *I* de la décade suivante. Lorsque (I-0,5 × ETP) < 0, la période est considérée comme révolue. La période dont la valeur cumulative est la plus élevée pour (I -0,5 x ETP), détermine le point le plus bas d'humidification du sol. Il faut vérifier si ce point diffère fortement de la profondeur calculée auparavant (pr_h), sur la seule base de la pluviosité totale de l'année d'observation.

Dans III.2.3, il est indiqué que les formes extrêmes de répartition des pluies peuvent occasionner dans *I* une différence maximale dans *I* de plus ou de moins 70 mm. Sur les sols les plus légers (0,05 cm³/cm³ comme taux d'humidité à pF 2,5), ceci peut signifier une différence de profondeur d'humidification de plus ou de moins 80 cm. Sur les sols les plus lourds (0,24 cm³/cm³ taux d'humidité à pF 2,5), cela donne une différence de plus ou de moins 40 cm. De telles différences de profondeur d'humidification, seulement occasionnées par des différences dans la répartition des pluies, peuvent provoquer une grande différence dans N_m et, par là même, dans Ni et N_s (figure II.14).

L'analyse graphique de l'effet possible de la répartition des pluies applique une règle approximative utilisée par la FAO pour déterminer la durée de la saison de croissance en Afrique occidentale. Pour une croissance sans entraves, il faut un surplus d'eau après correction de la pluviosité pour l'évapotranspiration potentielle. Une légère croissance est possible tant

que la pluviosité est plus élevée que la moitié de l'évapotranspiration potentielle.

La figure II.15 peut servir d'illustration. L'infiltration maximum par décade, pendant les quatre années d'observation, est de 62 mm dans la 23ème décade de 1976. Dans les décades précédentes aucune réserve d'importance n'a été constituée. Puis une réserve se constitue : 62 - (37/2) + 17 - (38/2)+15-(41/2) + 31-(43/2) = 45 mm. Additionné à la pluviosité de la 27ème décade et diminué de 0,5 × *ETP*, cela donne une réserve de 45 + 57 - (46/2) = 79 mm. Cette réserve maximum donne pour un taux d'humidité à la capacité au champ de 0,11 cm^3/cm^3, une profondeur d'humidification de grosso modo 79/0,11 = 718 mm, soit 72 cm.

En 1978, le sol est humidifié plus en profondeur, non à cause d'une décade à forte pluviosité, mais à cause de l'accumulation des pluies. Tout le surplus de la 20ème décade se perd à nouveau au cours de la 21ème. Mais le surplus total de la 22ème décade à la 27ème comprise comporte 107 mm, soit une profondeur d'humidification de 97 cm.

En 1977, le sol n'est humidifié qu'à 15 cm de profondeur. Malgré une pluviosité totale en 1979 à peu près égale à celle de 1976, la profondeur de l'humidification en 1979 est à peu près égale à celle de 1977 (19 cm), car les deux périodes de pluies ne se succèdent pas.

Une comparaison des données avec les résultats de simulation présentés dans II.3.6.4, montre que la règle approximative utilisée ici, sous-estime de 10 à 30 cm la profondeur d'humidification. Les valeurs absolues doivent donc être utilisées avec prudence. Mais l'approche a permis d'identifier l'année 1979 comme une année où l'équation II.6 entraîne une surestimation de (pr_h). La standardisation de N_i sera donc également inexacte pour cette année. Lorsque dans un tel cas N_s est inférieur à N_b, il faut considérer cette différence comme accidentelle. Il ressort de la figure II.14 qu'une estimation erronée de la profondeur d'humidification d'un ordre de grandeur de 40 cm, peut entraîner aisément une différence entre N_s et N_b d'au moins 5 kg/ha.

Question 8c : S'agit-il d'une année à pluviosité moyenne ou supérieure à la moyenne, précédée d'une année très sèche ?

Certaines indications (résultant également de nos propres recherches) démontrent que le rendement d'azote est plus élevé dans les années à pluviosité moyenne ou supérieure à la moyenne, à condition que l'année précédente ait été particulièrement sèche (Harpaz, 1975). Dans nos propres recherches, nous avons également trouvé des indications allant dans ce sens. En 1978, année avec une pluviosité légèrement en-dessous de la moyenne, le rendement moyen d'azote était nettement plus élevée que pendant l'année extrêmement sèche de 1977 pour les endroits où le total des pluies était identique. Sur le trajet de 0 à 600 mm, la différence augmentait en moyenne jusqu'à maximum 8 kg/ha (les extrêmes étant 2 et 15 kg). L'absence d'observations pluviométriques sur la plupart des sites d'observation ne permet pas d'évaluer quelle partie de cette peut être expliquée à partir d'une infiltration plus profonde due à un autre ordre de grandeur ou autre répartition des pluies.

Question 8d : La composition et la densité de la végétation permettent-elles de penser qu'il s'agit d'un écart accidentel ?

En plus de la fixation de l'azote, d'autres caractéristiques d'espèces ont été découvertes qui peuvent influencer le rendement d'azote, et donc en principe influencer également les caractéristiques des

végétations dans lesquelles certaines espèces dominent. Les fortes densités de fines racines favorisent l'absorption d'éléments nutritifs, ainsi qu'une installation rapide effective, un long cycle de croissance, une continuation de l'absorption des éléments nutritifs et de la croissance pendant la floraison. Sur le terrain, les caractéristiques spécifiques des différentes espèces des végétations mixtes se compenseront la plupart du temps, pour aboutir à une situation moyenne. Mais la dominance poussée d'une seule espèce peut entraîner un écart de la moyenne. Les cas constatés étaient liés à la continuation ou non de la croissance et à l'absorption active d'azote après le début de la floraison : de nombreuses dicotylédones continuent leur croissance, mais pas la plupart des graminées (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 115 ; tableau IV.3). La dominance d'une ou de plusieurs espèces « à croissance continue », en combinaison avec des pluies tardives, peut entraîner un N_s maximum d'environ 10 kg/ha au-dessus de la moyenne (voir les exemples ci-dessous). Dans certaines circonstances, une forte dominance d'espèces n'absorbant pas activement de l'azote après la floraison, et mourant dès le mûrissement (*Schoenefeldia gracilis, Loudetia togoensis, Elionurus elegans,* etc.) peut entraîner des valeurs N_s qui se situent plusieurs dizaines de pour-cent en-dessous de la moyenne : il s'agit là de végétations très ouvertes, installées très tardivement, résultant du démarrage irrégulier de la saison des pluies.

N_b peut être utilisé pour la suite de l'évaluation, pour peu que les conditions suivantes soient remplies : la composition de la végétation doit être atypique (II.3.6.2), l'écart doit être qualifié d'accidentel, et la différence entre N_s et N_b doit être conforme à l'ordre de grandeur susmentionné.

Voici quelques exemples pour lesquels la continuation de la croissance et l'absorption active d'azote après le début de la floraison sont les causes probables d'une valeur N_s au-dessus de la moyenne. Dans les monocultures denses créées sciemment de légumineuses *Alysicarpus ovalifolius* et de *Cassia mimosoides* sur du sable limoneux, et dans le cas d'une pluviosité de 400 mm, le rendement d'azote était de 50 et 80 kg/ha. Après standardisation, la valeur N_s se situait quand même respectivement à 6 et 21 kg/ha au-dessus de la valeur N_s de la végétation naturelle à cet endroit. *Alysicarpus ovalifolius* est une espèce à courte phase de croissance végétative et *Cassia mimosoides* présente une phase très longue, mais *Alysicarpus ovalifolius* notamment continue sa croissance et continue l'absorption des éléments nutritifs pendant la floraison et la formation des fruits, à condition que l'eau soit disponible en suffisance.

Lorsqu'elles (co-)dominent la végétation, les espèces non légumineuses qui continuent leur croissance après la floraison, auront également un rendement d'azote supérieur à la moyenne pour autant que cette période ne soit pas exempte de pluies. Au maximum cela peut représenter dans la strate herbacée 10 kg/ha d'azote de plus que la moyenne. De telles situations sont rares. En effet, il s'agit la plupart du temps de plantes à germination lente, qui dominent après un mauvais démarrage de la saison des pluies (schéma II.7). Ceci va vraisemblablement de pair avec une absorption d'azote moins efficace au cours de cette période, et après un mauvais démarrage une compensation par une longue période de pluies n'est pas évidente. *Cenchrus biflorus* est cependant une espèce à germination rapide qui continue sa croissance après le début de la floraison. C'est pourquoi il est possible que les végétations dans lesquelles cette espèce (co-)domine, présentent en moyenne un rendement d'azote supérieure de 40 %. Dans le cas de forte dominance, il se peut même que le rendement d'azote double ! Dans les pâturages qui sont dominés année après année par *Cenchrus biflorus* et où $N_s > N_b$, il est préférable d'utiliser la valeur N_s.

Il se peut que *Pennisetum pedicellatum* joue un rôle identique à *Cenchrus biflorus*. Des indications en ce sens ont été

découvertes dans un paysage de mosaïques de surfaces limoneuses avec des dépressions argileuses, où une exploitation intensive a entraîné une forte concentration des écoulements et une disponibilité accrue des éléments nutritifs dans les dépressions. Dans trois cas étudiés, le rendement moyen d'azote sur une période de 3 ans était supérieure de 8 kg/ha à une exploitation non intensive. Sur les neuf situations, trois accusaient un rendement supplémentaire de 20 à 25 kg, et dans ces cas seulement la végétation se composait pour 50 % ou plus de *Pennisetum pedicellatum*.

Lorsque les valeurs N_s divergentes ne peuvent être qualifiées d'accidentelles, il faut vérifier si l'écart est temporaire ou bien permanent (questions 9 et 10). Lorsque les écarts sont de caractère temporaire, il faut utiliser temporairement N_s, alors que N_b conserve sa valeur comme indicateur de la potentialité de l'unité en question. Lorsque les écarts sont permanents, N_s peut être utilisé en tant que tel pour l'évaluation des pâturages, mais le rapport avec N_b constitue une valeur importante pour estimer les profits dans une analyse de coûts et profits en vue d'une régénération éventuelle ($N_s < N_b$).

Question 9 : N_s est-il plus petit que N_b ?

Question 9a : La durée de la phase végétative des espèces dominantes est-elle plus courte que prévue compte tenu de la pluviosité moyenne ?

Une réponse positive à cette question (voir question 3, II.3.6.2) aura plus fréquemment des conséquences pour la production de la biomasse que pour le rendement d'azote, du fait que dans cette situation il n'y a pas assez de temps pour diluer complètement l'azote absorbé. Ceci est dû au fait que l'absorption d'azote est surtout déterminée par le statut du sol en matière d'azote, établi dans le passé, alors que dans la plupart des végétations, il y a compensation de l'absorption incomplète par la présence d'une ou de plusieurs espèces à croissance continue. Ceci n'est pas toujours le cas, notamment sur des surfaces argileuses découvertes dans le centre du Sahel : la présence de 99 % de *Schoenefeldia gracilis* et de 1 % de *Panicum laetum* a été constatée à plusieurs reprises (voir exemple de la question 2b).

En règle générale, une réponse affirmative à cette question confirmera la réponse positive à la question 9b.

Question 9b : Y a-t-il des indications pour supposer que N_s est inférieur à N_b de manière semi-permanente ?

Trois cas sont envisageables, qui peuvent tous trois être liés à la surexploitation. Le suivi des pâturages concernés est conseillé pour obtenir confirmation (fin de II.4.5.2).

Lorsque les espèces pérennes auraient pu avoir une place importante (schéma II.6), mais qu'elles ont disparu depuis 15 à 20 ans ou plus, N_s sera inférieur à N_b, à moins que N_b ait déjà été estimé sur la base de la dominance des espèces annuelles. On peut imaginer une situation où N_b est estimé sur la base de la

dominance des espèces pérennes, alors que pendant la période de travail sur le terrain, seules des espèces annuelles auraient été observées : il s'agit de jachères avec une végétation azonale, pour laquelle (sur la base du schéma II.6 et/ou des parties intactes de l'unité), on a supposé une absence temporaire des espèces pérennes (question 1d). En fonction de l'intensité d'exploitation, la différence entre N_s et N_b peut s'élever de 5 à 10 kg/ha d'azote dans le sud du Sahel et monter à maximum 20 kg/ha pour la savane déboisée.

Une pâture intensive sans application d'engrais (ou culture sans jachère effective) conduira à long terme à l'épuisement du sol, sauf autour des corrals et des points d'abreuvement. Cet épuisement concernera en premier lieu le phosphore (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 254) mais finira par se répercuter sur le rendement d'azote. Tout d'abord le rapport P/N de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance descendra en-dessous de 0,1, alors que les légumineuses sont peu nombreuses (voir fin de la question 2c), mais finalement ce rapport oscillera à nouveau autour de 0,1 pour des taux de phosphore et d'azote qui peuvent descendre autour de 0,5 et 5 g/kg. Ces taux varient en fonction des pluies et des espèces. C'est pourquoi il est préférable de comparer les mesures de taux d'azote (moyennes pondérées) avec les moyennes de la figure II.3. Des valeurs inférieures et des indications d'exploitation intensive pendant des dizaines d'années sont signe d'épuisement.

La dégradation physique du sol et la dégradation de la végétation s'effectuent plus rapidement, surtout lorsque l'intensité de pâture est élevée. Sur le sable vif, aux alentours des points d'abreuvement et des villages, notamment dans le nord du Sahel (même dans le sud du Sahel dans le cas de culture continue) la production est nulle ainsi que N_s. Les sols sensibles à l'encroûtement peuvent s'approcher de cette valeur lorsque la formation des croûtes augmente, notamment sur les sols sablo-limoneux de l'ensemble fluviatile et de l'ensemble détritique. Dans la mesure où des surfaces de plus en plus grandes restent sans végétation, le N_s diminue finalement jusqu'à des valeurs de 0 à 10 kg/ha (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 344).

Question 9c : Est-il question d'un sol à texture fine et est-ce que la biomasse produite a été calculée avec l'aide de l'équation II.15 (I < 250 mm) ?

La différence entre N_s et N b peut être causée par le fait que l'équation a été établie en calculant la moyenne des résultats de calculs sur la base d'une série de classes de texture (III.2.2.1 fin ; figure III.6). L'équation convient le mieux pour les sols limoneux. N_s peut être 2 à 3 kg/ha plus élevé que N_b, s'il est question d'un sol argileux lourd. Il n'y aura pas ou à peine de production sur de tels sols si I < 120 mm.

Si aucune des situations décrites jusqu'à présent ne concorde réellement avec l'unité de paysage concernée, on conclut qu'il s'agit d'un sol de fertilité inférieure à la moyenne. L'analyse ci-dessus concernant un épuisement éventuel a alors déjà donné des indications : taux d'azote inférieurs à ceux mentionnés dans la figure II.3 et/ou taux de phosphore inférieurs à ces valeurs divisées par 10.

Question 10 : N_s est-il supérieur à N_b ?

Question 10a : La durée de la phase végétative des espèces dominantes dépasse-t-elle celle escomptée compte tenu de la pluviosité moyenne, ou bien le taux des espèces pérennes est-il plus important ?

Bien que cette situation ne se présente plus actuellement, compte tenu de 15 années de sécheresse, il ne faut pas l'exclure pour l'avenir. Une période de pluies plus abondantes que la moyenne sur plusieurs années pourrait permettre aux graminées pérennes et aux espèces annuelles à longue phase végétative d'étendre leur habitat en direction du nord. Face à une telle extension, la réponse aux questions 2 et 3 ferait apparaître que la dominance observée n'est pas représentative pour l'unité en question. Lors du calcul de N_b leur présence ne serait alors pas prise en considération. Une durée plus longue du cycle entraînera rarement une valeur plus élevée de N_s (question 9a), mais conduira par contre à une augmentation de la biomasse. Une biomasse plus élevée d'espèces pérennes pourra donner dans le Sahel proprement dit, un rendement d'azote supérieur de 5 à 10 kg/ha.

Question 10b : Y a-t-il des indications permettant de supposer que N_s est en permanence plus élevé que N_b ?

Ceci peut être le cas lors d'un apport d'éléments nutritifs autour des puits et des corrals. Mis à part l'augmentation de la fixation d'azote due à un accroissement du taux des légumineuses, telles que Zornia glochidiata, ceci peut entraîner un maximum de 10 à 20 kg/ha supplémentaire de rendement d'azote (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 363). Même sur des sols sensibles à l'encroûtement, une augmentation de 10 kg/ha ne représente pas une exception, tant que le sol n'est pas extrêmement dénudé (Djitèye, 1981).

D'une manière générale dans l'évaluation des pâturages, il ne sera pas nécessaire d'en tenir compte, car les surfaces sont trop réduites et la végétation est dans la plupart des cas dominée par des espèces non appétées.

Question 10c : Est-il question d'un sol à texture grossière et la biomasse produite a-t-elle été calculée à l'aide de l'équation II.15 (I < 250 mm) ?

La différence entre N_s et N b peut être causée par le fait que l'équation a été établie en calculant la moyenne des résultats de calculs sur la base d'une série de classes de texture (III.2.2.1 fin ; figure III.6). L'équation convient le mieux pour les sols limoneux. N_s peut être maximalement 5 kg/ha plus élevé que N_b, s'il est question d'un sol sablonneux grossier. Ce maximum sera atteint dans le cas de I ~ 150 mm. Pour des sables vraiment grossiers la différence sera 2 à 3 kg/ha à I ~ 100 mm ; la production des sols limoneux serait encore négligeable dans ce cas. La différence diminue progressivement à des valeurs de I > 150 mm, car l'azote au lieu de l'eau devient de plus en plus limitatif (la raison pour fixer une limite

supérieure à l'équation II.16).

Si l'écart ne peut être expliqué (entièrement) par l'une des situations mentionnées ci-dessus, c'est que le sol de l'unité concernée présente une fertilité au-dessus de la moyenne. Il faut s'attendre alors à ce que le taux d'azote de la végétation soit supérieur à celui indiqué dans la figure II.3. Si l'année d'observation a été très sèche, la quantité moyenne d'azote absorbé pourrait dépasser N_s, car la standardisation en rapport avec la pluviosité ne tient pas compte de sa répartition (voir fin de la question 7). Lorsque les observations s'étendent sur une année, il faudra se contenter de la valeur obtenue (voir également II.4).

Question 11 : S'agit-il de relevés effectués sur des unités fortement dominées par les espèces ligneuses et/ ou par les graminées pérennes ?

Compte tenu du fait que la méthode présentée a été développée au Sahel sur des pâturages dominés par des espèces annuelles à recouvrement ligneux relativement limité, les résultats de cette méthode doivent être considérés sous un angle critique lorsqu'elle est appliquée pour la savane. Dans les régions où les graminées pérennes dominent la biomasse et/ou le recouvrement ligneux est élevé, il sera vraisemblablement plus fréquemment nécessaire d'utiliser N_s à la place de N_b pour poursuivre l'évaluation.

Lorsque finalement, lors de l'évaluation de régions plus vastes, les unités du Sahel - caractérisées par les valeurs N_b - sont comparées avec des unités de la savane ou des plaines d'inondation caractérisées par les valeurs N_s, la prudence est de rigueur. Dans les cas où les unités sont fortement dominées par les graminées pérennes, il faut pour la comparaison avec les valeurs N_b prendre 40 % de la valeur N_s , car pour les graminées pérennes l'azote provient pour 60 % de la recirculation interne.

Leloup et Traoré (1989) ont appliqué la méthode présentée, pour la savane soudanaise du sud, dans une région avec une pluviosité moyenne de 1050 mm. Bien que les graminées pérennes y étaient décimées, le recouvrement ligneux y était encore très important. Le tableau II.15 démontre que la valeur moyenne N_s de la région (9,7 kg/ha) ne s'écarte pas fortement de N_b (6,3 kg/ha) ; cette différence reflète vraisemblablement une ancienne dominance de graminées pérennes. La comparaison de N_s et N_b par unité de paysage apparaît cependant moins satisfaisante.

Tableau II.15
Comparaison de N_s et N_b pour diverses unités de paysage, avec des densités d'arbres différentes, à Fonsébougou (sud du Mali).

	superficie (%)	recouvrement (%)	N_b (kg/ha)	N_s (kg/ha)

unité				
manteau	13	51	7	5
ébouli	15	40	8	14
glacis cuirassé	21	18	10	9
glacis non-cuirassé	34	66	1	9
zone hydromorphe	6	48	17	14
moyenne pondérée :			6,3	9,7

II.3.6.6. Calcul de la biomasse

Lorsque le choix a porté sur N_b ou N_s, il est possible à l'aide des informations de la figure II.3, de calculer la biomasse aérienne de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance d'une année moyenne :

$$B = 1000\ N_b \text{ (ou } 1000\ N_s) / [N] \qquad \text{(équation II.21)}$$

dans laquelle :
B = la biomasse (kg/ha) ;
$[N]$ = taux d'azote (g/kg).

Dans certaines situations, la figure II.3 doit être utilisée avec discernement, car elle est basée sur un nombre d'hypothèses concernant la composition floristique et le taux d'azote des groupes d'espèces. Lorsqu'il ressort de l'analyse des observations sur le terrain, que la composition floristique ou le taux d'azote de la biomasse totale s'écarte nettement de la moyenne, et que ces écarts ne sont pas accidentels, il est bon d'évaluer avec l'aide de la figure I.12 une nouvelle moyenne pondérée du taux d'azote pour la totalité de la biomasse. Cette situation peut se présenter lorsque les réponses aux questions 9a et 10a sont positives. Par contre, il faut que les sols relativement pauvres ou riches divergent fortement de la moyenne pour entraîner un écart mesurable du taux d'azote moyen de la strate herbacée (questions 9b et 10b).

Après le calcul de la biomasse, il faut encore estimer la quantité potentielle de repousses de la saison sèche dans le cas de dominance par les graminées pérennes (II.2.2.4 et 5).

II.3.6.7. Extrapolations

Le calcul de la biomasse et du taux d'azote permet de calculer la production animale pour une année moyenne (II.5).

Pour tenir compte du critère de durabilité pour l'élevage, il est conseillé de baser l'estimation de la charge maximale admise pour les pâturages dans le Sahel proprement dit, sur la situation fourragère d'une année sèche (I.3.4). Celle-ci peut être déterminée conformément à la procédure décrite dans II.2.2.4.

Une autre extrapolation utile est celle visant une situation d'équilibre pour une autre charge de bétail ou pour une autre gestion, par exemple la limitation des feux. Dans les deux cas, la nouvelle situation fourragère peut être estimée en adaptant la valeur f et en recalculant N_b (II.3.4). Lorsque les écarts entre N_s et N_b revêtent un caractère permanent, il faut calculer un N_b théorique avec une valeur de f réajustée ; la valeur obtenue devra être exprimée en pourcentage par rapport au N_b d'origine. La valeur de N_s choisie dans ces situations peut alors être multipliée par ce rapport.

II.3.7. La carte définitive des unités de paysage ; illustrations

Cette section illustre de deux façons l'approche présentée. L'évaluation pas à pas se fait tout d'abord pour une unité, selon le schéma II.1. Les résultats obtenus pour la région évaluée à titre d'exemple (trajet nord-sud ; carte en annexe) sont ensuite analysés globalement.

II.3.7.1. Evaluation d'une unité

L'unité choisie pour l'illustration est composée de dunes prononcées longitudinales. Cette unité se situe à l'extrême nord de la région évaluée, autour de l'isohyète 250 mm (voir carte en annexe). C'est pourquoi le calcul de la production pour les endroits d'observation avec ruissellement (I < 250 mm) se basera sur l'équation B (équation II.15 de la croissance limitée par l'eau) et pour les endroits sans ruissellement ($I \geq$ 250 mm) sur l'équation N_b (équation II.7 pour la croissance limitée par les éléments nutritifs).

Cartes provisoires (II.3.2)

Au moment de l'établissement provisoire des cartes, cette région de dunes avait été cartographiée comme une seule unité. Du point de vue géomorphologique, ces dunes longitunales prononcées avaient été classifiées comme des sables éoliens. La pluviosité annuelle moyenne est de $\leq$ 300 mm. Selon les données des ouvrages spécialisés, la charge de bétail serait environ de 10 ha/UBT ; l'exploitation des pâturages se produit vraisemblablement surtout pendant la période des pluies.

Lors de l'interprétation des photos aériennes, l'unité « dunes longitudinales prononcées » (i) n'avait pas été subdivisée en niveau d'unité géomorphologique (ii) et de forme (iii). Les pentes apparaissent clairement ; selon la classification FAO, le terrain est ondulé. Un profil de végétation est à peine discernable (végétation homogène ; iv), ce qui en combinaison de pentes à déclivité assez forte, indique une texture sablonneuse ; le ruissellement semble très limité. Le taux de recouvrement par les arbres et arbustes est probablement négligeable, mis à part dans les parties les plus basses des vallées (codes

respectifs 0 et 1).

Travail sur le terrain à la fin de la saison sèche (II.3.3)

Lors du travail sur le terrain, il est apparu qu'une différenciation s'imposait entre les sables rouges et les sables jaunes (voir II.3.3.1). Seuls ces derniers seront traités ici.

La surface du sol présente à peine des formations de croûtes. L'amas de sable est très épais, le profil de sol a une texture homogène, et les différences entre les sites d'observations sont minimes. En moyenne la composition granulométrique est de 87 % de sable, 5 % de limon et 8 % d'argile, le sable étant assez grossier. Ce n'est que dans le nord de l'unité (site 3) que la couche supérieure du sol des vallées présente une composition granulométrique un peu plus fine.

Les observations concernant les espèces ligneuses ont été représentées dans le tableau II.16. *Acacia raddiana* est l'espèce dominante, surtout en ce qui concerne sa contribution au recouvrement. La densité est tellement faible que la superficie d'échantillonnage de 1 ha par site d'observation est en fait trop réduite ; c'est pourquoi toutes les espèces n'ont pu être répertoriées partout. *Boscia senegalensis* ne se rencontre que (rarement) sur le site 1 ; on assiste vraisemblablement à cet endroit à l'influence de l'ensemble détritique. *Salvadora persica* n'a été observé que sur le site le plus au nord (3). Ceci pourrait constituer un argument en faveur d'une séparation de la partie nord de l'unité, d'autant plus que la densité des arbres y diffère du reste (III.3.2.1 ; vi). Cette séparation n'a cependant pas été effectuée, car l'absence absolue de Salvadora persica n'a pu être vérifiée ailleurs, et la densité des arbres dans le nord était plus élevée, au lieu d'être plus faible.

Le recouvrement de 2 à 3 % est plus élevé qu'escompté. Il y a en effet peu de différence entre les dunes et les vallées interdunaires, à l'exception des vallées du site 3. Compte tenu de la présence d'arbres morts, notamment de vieux *Acacia raddiana* de grande taille, le recouvrement avant le début de la sécheresse, au début des années 70 était vraisemblablement 5 à 6 % supérieur.

Tableau II.16
Composition des espèces, densité et recouvrement des arbres et arbustes à trois sites d'observations dans l'unité E11 au cours de la seconde moitié des années '70.*

	densité (n/ha)				recouvrement (%)			
	1	2	3D	3H,R	1	2	3D	3H,R
Acacia raddiana	1	15	33	20	0,2	2,2	1,5	2,5
Balanites aegytiaca	1		2	2	0,0		0,0	0,0
Boscia senegalensis	1				0,0			

Commiphora africana	13		6	5	2,5		0,1	0,3
Leptadenia pyrotechnica	1			4	0,0			0,0
Maerua crassifolia		1	12	2		0,0	0,8	0,0
Salvadora persica		25	2				2,2	0,1
totaux	17	16	78	35	2,7	2,2	4,6	2,9

* sur le troisième site, l'échantillonnage a été fait séparément pour la vallée (avec concentration des écoulements : 3D) et les dunes (à infiltration homogène : 3H, ou à ruissellement : 3R).

Les traces de l'activité des termites n'apparaissent pas clairement, mais il subsiste peu de restes de biomasse de la strate herbacée de la saison précédente. Ceci pourrait être dû à une charge de bétail dépassant les estimations, mais l'absence de données concernant la pluviosité et la production de la biomasse de l'année précédente ne permettent pas de le certifier.

Réajustement de la carte provisoire

Les dunes rouges (D11 ; voir carte en annexe) ont été séparées de l'unité sables éoliens. Une zone de transition a été distinguée entre les sables éoliens et l'ensemble détritique (E11/$C_3$1 ; voir carte). Cette zone se compose essentiellement de sable jaune, mais le terrain est plus plat que dans E11, la partie restante des sables jaunes.

Certaines observations générales non quantifiées, font état de la présence plus forte de *Boscia senegalensis* dans la zone de transition que sur le site d'observation 1, situé sur la frontière de cette zone et de E11. Par ailleurs, on y constate la présence ci et là d'*Euphorbia balsamifera*.

Estimation théorique de N_b (II.3.4)

Estimation de I
Les caractéristiques de la surface du sol, la texture grossière et les différences minimes entre le recouvrement ligneux sur les dunes et sur les vallées, indiquent un faible coefficient de ruissellement et une faible redistribution des pluies. Sur trois sites sélectionnés 1, 2 et 3, la pluviosité moyenne annuelle est respectivement de 275, 225 et 200 mm. La texture assez grossière du sable et les différences minimes dans le recouvrement par les arbres entre les vallées et les dunes, laissent supposer qu'il n'y a pas de redistribution sur les sites 1 et 2 ($P = I$). Ceci est par contre le cas sur le site 3 : R y est estimé à 0,05 (tableau I.1). La partie de l'unité avec ruissellement (SUR_{ru}), la partie avec une infiltration homogène (SUR_{ho}) et la partie composée de vallées ($SUR_{dé}$) sont estimées respectivement à 0,2, 0,7 et 0,1.

I est calculé ensuite à l'aide des équations II.12, II.13 et II.14. Il n'a pas été tenu compte de pertes éventuelles hors de l'unité : l'interprétation des photos aériennes a démontré qu'il n'y a pas de profils de drainage, et il ressort du tableau II.13 que dans le cas de sols sablonneux avec une valeur de 0,05 pour R

et une valeur de 0,1 pour $SUR_{dé}$, la valeur pour K_r n'est que de 0,01.

Les valeurs calculées pour *I* ont été rassemblées dans le tableau II.17.

Tableau II.17
Récapitulation de l'estimation de l'infiltration et des estimations de la production de la biomasse (matière sèche : m.s.) pour la strate herbacée, le taux d'azote et la valeur N_b pour l'unité E11 pour une année à pluviosité moyenne.

	I (mm/an)	N_b (kg/ha)		[*N*] (g/kg)		m.s. (kg/ha)
site						
1	275	13,4	___	9,0	—>	1489
2	225	13,4	<—	10,5	___	1281
3R (0,2)*	190	11,9	<—	12,3	___	971
3H (0,7)*	200	12,1	<—	11,4	___	1062
3D (0,1)*	216	13,3	<—	11,1	___	1202

* fraction de l'unité dans son ensemble ; —> m.s. déduit de, <— N_b déduit de

Calcul de N_b

Tout d'abord il s'agit de vérifier le risque de pertes par percolation. Pour une teneur en sable de 87 %, le taux d'humidité est de 0,09 cm^3/cm^3 à pF 2,5 (équation II.5). Il ressort de la figure II.12, que pour des pertes dues à la percolation sur de tels sols, *I* doit être > 400 mm, ce qui ne sera pas le cas sur les sites (tableau II.17), donc *Pe* = 0.

Les pertes par percolation à cause de sols peu profonds ne se produiront pas, compte tenu de l'épaisseur de l'amas de sable.

Le taux de recouvrement ligneux (< 15 %) et le nombre de couches de feuillage ($\leq$ 2) ne nécessite pas de correction pour l'influence exercée par les espèces ligneuses. Le N_b de la strate herbacée peut donc être calculée directement à l'aide des équations II.15 et II.16 (*I* < 250 mm/an) et de l'équation II.7 ($I \geq 250$ mm/an).

Pour le site d'observation 1, I = 275 mm, il faut donc utiliser l'équation II.7 pour le calcul de N_b. Pour cela il faut estimer la valeur de f. La valeur moyenne pour une pluviosité de 275 mm/an est de 0,33 (figure II.4). Il faut savoir si la charge du bétail estimée à 1 UBT annuellement pour 10 ha, sur la base de la documentation, donne lieu à utiliser une autre valeur pour f lors de l'exploitation pendant la période des pluies. Une UBT sur 10 ha signifie annuellement une consommation de 200 kg/ha. La figure II.2 permet de déduire, que lorsque P = 275 mm et $I \sim P$, la production escomptée est de 1400 kg/ha, dont 14 % seraient donc consommés. Compte tenu de la sélectivité de pâture du bétail, la fraction de N_b absorbée est 1,5 fois plus grande (Diallo, 1978), soit 21 %. La moitié est perdue, soit fc = 0,21/2 ~ 0,10. Suite aux pertes par volatilisation (0,15) et voracité (0,10), cela donnerait un ftotal de 0,35 (III.2.2.2.). La fréquence des feux apparaît faible, donc ces pertes ne sont pas prises en considération. L'azote consommé ne peut se perdre par volatilisation ou par voracité. Lorsque l'exploitation s'effectue pendant la saison des pluies, ces pertes peuvent être diminuées au maximum de 21 %, soit de : (0,15+0,10) x 0,21= 0,05. La valeur de f pour l'estimation de N_b sera 0,35-0,05= 0,30, une valeur qui ne s'écarte que peu de la moyenne. Selon l'équation II.7, N_b est alors égal à 13,4 kg/ha.

Le tableau II.17 donne une vue générale des autres valeurs et résultats utilisés. Il comprend également la valeur N_b pour tous les sites. La valeur moyenne de N_b pour l'unité est de 12,8 kg/ha.

Travail sur le terrain à la fin de la saison des pluies (II.3.5)

Les résultats du travail effectué fin septembre 1977 sont représentés dans le tableau II.18. La pluviosité de cette année a été estimée sur la base de trois mesures pluviométriques relativement éloignées des sites d'observation.

Tableau II.18
Récapitulation des observations sur la strate herbacée à la fin de la saison des pluies de 1977, pour trois sites d'observations de l'unité E11.

	1	2	3D	3R,H
pluviosité (mm/an)	120	10	100	100
matière sèche (kg/ha)	620	60	510	520
répartition de matière sèche (%) :				
- espèces à germination rapide , C_4				
graminées[1)] (%)	83	4	65	81
dicotylédones (%)		4		1
- espèces à germination lente, hétérogène				

graminées, C_4 (%)		88	35	7
dicotylédones, C_4 (%)	2			5
légumineuses	6			3
autres dicotylédones C_3	1	-	-	1
N_m (kg/ha)	4,00	1,46	6,22	5,96
P (kg/ha)	0,75	0,11	0,92	1,05
N/P	0,19	0,08	0,15	0,18
espèces dominantes[2)]				
Alysicarpus ovalifolius	+	o		
Aristida mutabilis	+++	o	+	o
Aristida funiculata			++	
Cenchrus biflorus	++	o	+	++
Chloris Prieurii	o	o	++	o
Leptothrium senegalense		o	++	+++
Tragus berteronianus	+	+++	+	o

[1)] pérennes de petite taille compris, voir II.3.6.2 ;

[2)] uniquement espèces qui constituent au moins à un endroit >= 5% de la biomasse ; o : présente, mais sans importance pour la biomasse ; + : 5 à 10 % de la biomasse ; ++ : 10 à 50% ; +++ : > 50 %.

Interprétation du travail sur le terrain (II.3.6)

Question 1 : La composition floristique sur les sites choisis diffère-t-elle à l'intérieur de l'unité ? Il ressort du tableau II.18 que notamment le site 2 diffère des autres : les graminées à germination lente y dominent. Pourtant ce site se situe clairement à l'intérieur de l'unité E11 (question 1a). Aucune indication ne signale que cette différence ait été occasionnée par une forte exploitation (question 1b) ou (d'absence) des feux (question 1c). La dominance de *Tragus berteronianus*, une espèce peu productive à germination lente, peut probablement être expliquée par une pluviosité très faible et irrégulière sur ce site (question 1d). L'estimation concernant la pluviosité de ce site (10 mm) effectuée par interpolation, est insuffisante pour permettre la germination de *Tragus berteronianus* (Elberse & Breman, 1989), et semble donc un peu faible. Mais compte tenu de la production minimale, il semble probable que le site 2 bénéficie d'une pluviosité moindre que 1 et 3. La composition divergente du site 2 doit probablement être considérée comme accidentelle.

Question 2 : Le taux des groupes d'espèces individuelles s'écarte-t-il de celui indiqué dans le schéma II.6, compte tenu de la région dans laquelle se situe l'unité et de la relation entre la pluviosité et l'infiltration ?

Selon le schéma II.6, il faut s'attendre à une végétation dans laquelle les graminées à photosynthèse C_4, notamment à germination rapide, mais également à germination lente ou hétérogène, dominent. Les dicotylédones à photosynthèse C_4 sont d'importance secondaire, elles sont représentées de façon quasi analogue à celle des espèces à germination rapide et hétérogène ou lente. Les dicotylédones à photosynthèse C_3 ne peuvent être présents de façon limitée que dans les vallées.

Les observations vont dans ce sens, la preuve en est la moyenne des 3 sites : 56 % de graminées C_4 à germination rapide ; 36 % de graminées C_4 à germination lente ; 2 % de dicotylédones C_4 à germination rapide ; 3 % de dicotylédones C_4 à germination lente et 3 % de dicotylédones C_3. Les graminées dominent davantage que prévu. L'écart du site 2 a déjà été analysé (voir également II.3.6.2, question 2c).

Question 3 : La durée de la phase végétative des espèces dominantes observées correspond-elle à la durée escomptée compte tenu de la pluviosité moyenne et du substrat ?

Pour *I* compris entre 200 et 275 mm, la durée de la saison de croissance (calculée en multipliant *I* par 0,13) est de 30 jours environ. C'est là la durée moyenne du cycle de *Cenchrus biflorus* qui germe à la mi-juillet (tableau IV.3). La végétation dans l'unité E11 est en effet dominée par la communauté dont le nom est emprunté à cette espèce (schémas II.8, II.9 et tableau II.18). Cette espèce n'est pas la plus répandue, bien que l'unité se situe dans le sud du nord-Sahel. Les espèces les plus répandues sont celles qui sont également présentes plus au nord, telles *Tragus berteronianus*, *Leptotrium senegalense* et *Aristida mutabilis*. Bien que ces espèces soient relativement peu connues (IV.2), il est probable que la durée moyenne du cycle soit plus courte que ne laisse supposer le site.

Question 4 : Existe-t-il des arguments en faveur d'une correction de la valeur estimée de I ?

Le substrat de l'unité est tellement sablonneux, qu'il ne peut y avoir de ruissellement important ; les erreurs éventuelles dans l'estimation de *I* ne peuvent donc être importantes. La modicité du ruissellement apparaît clairement compte tenu de la production « identique » des sous-unités 3D et 3H,R (tableau II.18).

Question 5 : Y a-t-il des arguments en faveur d'une correction de la valeur estimée de f ?

Aucune graminée pérenne n'a été observée. La composition de la strate herbacée indique qu'il n'y a pas eu récemment de graminées pérennes (pas de caractère rudéral). Il n'y a donc pas lieu de considérer une autre valeur f et de recalculer N_b.

Par contre des indications ont été trouvées selon lesquelles l'occupation des pâturages pourrait bien être le double de la première estimation de 1 UBT par 10 ha. Lorsque ceci est le cas depuis longtemps la

valeur de f_c serait de 0,20, c'est-à-dire 0,05 de plus que la valeur estimée.

Ceci entraîne des conséquences pour le N_b qui a été estimé pour le site 1, car à cet endroit c'est l'équation N_b qui a été utilisée. Au lieu de la valeur de 13,4 kg/ha (tableau II.17), on obtient 10,4 kg/ha. La biomasse escomptée devient ainsi 10,4/0,009 = 1156 kg/ha de matière sèche au lieu de 1489 kg/ha. Pour la totalité de l'unité N_b est alors de 12,0 au lieu de 12,8 kg/ha.

Question 6 : La contribution des légumineuses à la biomasse de la strate herbacée n'est-elle pas égale à 5 % ?

Sur aucun des sites le taux de légumineuses n'est égal à 5 % (tableau II.18) : pas de légumineuses sur les sites 2 et 3D, 6 % sur le site 1 et 3 % sur 3R,H. A l'aide de l'équation II.18, il est possible de calculer N_i (valeur corrigée de N_m pour le taux de légumineuses) (tableau II.20).

Question 7 : La quantité et/ou la répartition de la pluviosité s'écarte-t-elle de la moyenne ?

La pluviosité s'écartait de la moyenne, du moins en ce qui concerne la quantité : au lieu de 275, 225 et 200 mm les extrapolations des mesures des stations avoisinantes ont donné pour les sites 1, 2 et 3 respectivement 120, 10 et 100 mm. La profondeur d'humidification du sol (pr_h) a certainement été en-dessous de la normale. A l'aide des équations II.5 et II.6, pr_h a été calculé pour la pluviosité moyenne et pour la pluviosité pendant 1977, l'année d'observation (tableau II.19). Le taux de sable était estimé à 87 %.

Tableau II.19
Standardisation de N_i (=N_s) de 1977 sur la base de l'humidification du sol pendant une année normale et en 1977 pour les trois sites d'observation de E11.

	I (mm/an)		pr_h (cm)		N_s
	normal	'77	normal	'77	
site					
1	275	120	128	32	$N_i \times 0{,}84/0{,}42$
2	225	10	97	0	$N_i + (0{,}77\text{-}0) \times 15$
3D	190	95	75	16	$N_i + (0{,}73\text{-}0{,}21) \times 15$
3R,H	216	108	91	24	$N_i + (0{,}76\text{-}0{,}33) \times 15$

La figure II.7 permet à présent de recueillir pour le site 1 (I > 120 mm) les fractions de la production moyenne d'azote au cours d'une année moyenne (F50) et au cours de l'année d'observation (F_{am}). N_s peut ensuite être calculé à l'aide de l'équation II.19.

Sur les autres sites I est < 120 mm et la valeur maximum de N_b est supposée de 15 kg/ha : c'est ainsi qu'on calcule ce qui doit être ajouté à N_i (équation II.20). Une vue générale de la correction de N_i est indiquée dans le tableau II.19, le N_s qui en résulte est indiqué dans le tableau II.20.

Tableau II.20
Rendement d'azote mesuré (N_m) corrigé en fonction de la contribution des légumineuses à la végétation (N_l) ; N_i standardisé pour la pluviosité (N_s), pour les trois sites dans l'unité E11, en comparaison au N_b calculé.

	N_m	N_i	N_s	N_b
site				
1	4,0	3,9	7,8	10,4
2	1,5	1,5	13,0	13,4
3D	6,2	6,7	14,5	13,3
3R,H	6,0	6,3	12,7	12,0

Question 8 : Y a-t-il divergence entre N_s et N_b ?

La valeur moyenne de N_b pour l'unité E11 est de 12,0 kg/ha. La valeur moyenne de N_s est de 11,3 kg/ha. La valeur un peu plus basse pour N_s s'explique par la faible valeur de N_s sur le site 1, les autres sites concordent (tableau II.20). Il n'y a donc pas de raison pour ne pas utiliser la valeur théorique de N_b pour le calcul de la biomasse (II.3.6.6) et pour le calcul de la capacité de charge.

Extrapolation pour une année sèche (II.3.6.7)

Au cours d'une année normale, l'unité E11 présente un N_b de 12,0 kg/ha. A partir d'une pluviosité moyenne annuelle de 230 mm, le taux d'azote est d'environ 10,5 g/kg (figure II.3) et la production

annuelle de la strate herbacée est donc de 1440 kg/ha (équation II.16).

Au cours d'une année sèche (p10%), la pluviosité est de 130 mm au lieu de la moyenne de 230 mm (figure II.1). La profondeur d'humidification du sol sera alors de 38 cm au lieu de 100 cm (équation II.6). Selon la figure II.7, le rendement d'azote atteint donc 0,52 fois le maximum moyen pendant une année sèche, contre 0,78 fois le maximum pendant une année normale. Le rendement d'azote pendant une année sèche est donc 0,52/0,78 × 12,0 = 8,0 kg/ha. Le rendement d'azote pendant l'année d'observation était loin en-dessous de ces valeurs, mais il est vrai que la pluviosité était moindre pendant l'année en question : en moyenne sur les trois sites elle était de 77 mm, ce qui signifie une probabilité de 1 %.

La production de la biomasse pendant une année sèche peut être estimée à partir de la figure II.3 (taux d'azote de 16 g/kg) et de l'équation II.16, soit : 500 kg/ha.

II.3.7.2. Evaluation du trajet nord-sud

Situation à la fin des années soixante-dix

La carte annexée à ce manuel présente les unités de paysage définitives et leur répartition géographique. Pour chaque unité, des informations sont fournies quant au rapport entre les aires à infiltration homogène, à ruissellement, à concentration des écoulements et quant au recouvrement ligneux de ces sous-unités. Ont également été mentionnés, les cas où la composition de la végétation a constitué le critère pour la différenciation des unités. Dans ce cas précis, il est question d'une variante unité nord et unité sud lesquelles seraient sinon difficilement différenciables.

La carte topographique jointe permet de se faire une idée de la redistribution éventuelle de l'eau entre les unités, quelques coupes longitudinales schématiques des paysages sont également présentées.

Le résultat de l'évaluation de toutes les unités ne présente pas d'intérêt pour les utilisateurs non maliens de ce manuel. C'est pourquoi ces résultats sont publiés séparément (Breman & Diarra, 1991). Dans la présente, seul certains éléments sont fournis en tant qu'illustration. Le tableau II.21 indique pour un nombre d'unités de paysage, la production de la strate herbacée et la production totale de pâturage aérien (feuilles, fruits et tiges) pour une année moyenne. Ce tableau indique également la quantité d'azote dans la production annuelle de la strate herbacée ainsi que le taux d'azote.

Tableau II.21
Impressions de la productivité de pâturages intacts, situés sur un trajet dans le centre du Mali entre le nord de la savane et le nord du Sahel, fin de la saison des pluies, seconde moitié des années '70.

	P (mm)	rendement de N (kg/ha)		strate herbacée		fourrage ligneux (kg/ha)
		N_b	N_s	[*N*] (g/kg)	biomasse (kg/ha)	
ensemble éolien						
E11	250	10,6		9,6	1100	20
E71	250	10,8		9,0	1200	40
E31	340	11,3		7,5	1500	20
E72	390	(12,4)	8,2	7,0	1200	20
E73	430-460	14,2		6,4	2200	300
E12	460-480	13,9		6,6	2100	200
E32	460-480	13,4		6,7	2000	500
ensemble détritique						
D11	250	9,4		9,4	1000	20
C23	300-350	(8,0)	3,8	17,5	200	200
C41	300-350	(20,4)	6,4	12,8	500	400
D21	310-340	(13,0)	5,5	8,2	700	400
D12	470	14,5		6,6	2200	500
C24	470-490	(11,5)	7,5	15,0	500	400
C42	480	(13,0)	20,1	6,7	3000	1800
ensemble fluviatile						
F47	370-480	(17,7)	14,2	5,0	2800	400
F45	400-530	15,8		6,6	2400	100
F46	430-550	13,6		5,9	2300	1700
F31	530-560	14,0		6,7	2200	400
F10	530-570	14,3		6,5	2200	100
F20	530-570	13,5		6,4	2100	600
F41	540-570	11,3		6,3	1800	700
F42	540-570	12,6		5,0	2500	1800
F32	560-570	12,0		6,3	1900	700
G11	360	-	7,0	10,0	700	700
G12	580	-	26,0	4,0	6500	400

Le rendement d'azote indiquée correspond en principe à la valeur du N_b (estimation théorique) à moins que sur la base des observations sur le terrain, le choix n'ait porté sur le rendement d'azote standardisé (N_s).

Le tableau rassemble les moyennes pondérées des cas où des sous-unités ont dû être instaurées par suite de la redistribution d'eau à l'intérieur d'une unité. L'évaluation a cependant été faite par sous-unité. La moyenne pondérée est une valeur hybride, lorsque N_b est utilisé pour les aires avec ruissellement, alors que le choix a porté sur N_s pour la région avec accumulation des écoulements. De telles valeurs hybrides sont indiquées sous N_s.

Les différences entre les aires avec concentration des écoulements et celles avec ruissellement, sont limitées dans les unités de l'ensemble éolien, à cause de la forte capacité d'infiltration. En moyenne, le rendement d'azote dans les aires à concentration des écoulements est à peine 1,3 fois aussi élevée que dans les aires à ruissellement. Pour l'ensemble détritique, le facteur de multiplication est supérieur à 3, cependant avec une grande différence entre les unités sablonneuses (D) et limoneuses (C) (respectivement 2 et 3,5). Parmi les unités C, il y a également une grande différence entre les unités du nord (facteur 5) et celles du sud (facteur 3). A l'intérieur de l'ensemble fluviatile, la différence moyenne est d'environ 2,5, mais là aussi il y a une différence entre les unités sablonneuses (2) et limoneuses (3).

Pour les sous-unités avec infiltration homogène (parties E11 et E71 ; unités D11 et 12, E31 et 73) et concentration des écoulements, l'équation II.7 a été utilisée sur tout le trajet pour le calcul de N_b. Le critère $I > 250$ mm s'y est vérifié. A l'intérieur de l'ensemble détritique, on a utilisé pour toutes les sous-unités avec ruissellement, l'équation II.15 ($I \leq 250$ mm) sur tout le trajet. Pour les aires avec ruissellement à l'intérieur des deux autres ensembles, l'importance de l'écoulement était décisive, mais globalement l'isohyète de 425 mm constituait la limite : au nord de celle-ci il fallait utiliser l'équation II.15 et au sud l'équation II.7.

La disponibilité en eau sur le trajet semble varier beaucoup plus que la disponibilité potentielle d'éléments nutritifs en provenance de sources naturelles. Il en résulte que ce sont surtout les variations de disponibilité en eau qui sont responsables des différences de rendement d'azote et de la production de la biomasse du nord vers le sud, entre les unités et à l'intérieur des unités. A l'intérieur d'un ensemble, ces valeurs augmentent proportionnellement à la pluviosité moyenne, tel qu'il ressort du tableau ; d'un point de vue global, l'ensemble fluviatile situé le plus au sud présente la plus forte productivité.

Pour une pluviosité donnée, le rendement d'azote est le plus bas à l'intérieur de l'ensemble détritique. Ceci provient de la forte redistribution de l'eau entre les unités et à l'intérieur des unités, dû au ruissellement en surface. Bien que pour la pluviosité donnée, les pertes d'eau hors de cet ensemble seront de manière générale inférieure à 10 %, l'utilisation de l'eau est quand même moins efficace à cause de la concentration locale : des flaques et des mares temporaires entraînent une percolation et des pertes supplémentaires par évaporation ; la présence prolongée de marécages fera croître les pertes d'azote par

dénitrification. De toute façon, la production de la strate herbacée dans les dépressions avec accumulation des écoulements n'augmentera pas parallèlement à la disponibilité en eau, car les éléments nutritifs y constituent le facteur limitatif. Par ailleurs, la concurrence avec les espèces ligneuses pour les éléments nutritifs et pour la lumière augmente rapidement, car la capacité concurrentielle des espèces ligneuses augmente à cause de l'infiltration plus profonde de l'eau. Aussi, le recouvrement ligneux et par là même la production de pâturage aérien est supérieure dans l'ensemble détritique à celle des deux autres ensembles pour une pluviosité donnée (tableau II.21). Compte tenu des pertes signalées d'eau et d'azote, ceci ne compense pas complètement la plus faible production de la strate herbacée.

La fertilité du sol ne semble pas une variable importante ; elle l'est pourtant : la différence entre N_s, uniquement basé sur une année d'observation sur trois sites par unité, et N_b, doit être importante avant de pouvoir conclure à une différence significative de fertilité du sol. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'année d'observation est plus sèche que la normale (pluviosité de 1977 probabilité de 1 % !) et que I est ainsi tellement limité, qu'il faille utiliser l'équation II.19 pour la correction de N_i compte tenu de l'écart de la pluviosité par rapport à la normale.

Certaines indications démontrent clairement que la fertilité du sol de E 72 est inférieure à celle des unités avoisinantes : N_s représentait environ 2/3 de N_b. Les observations sur quatre années consécutives confirment cette impression. La courbe inférieure (IV) de la figure III.9 est basée sur ces résultats. L'unité constitue le flanc du delta mort (voir carte en annexe), où la densité de population est la plus élevée ; l'agriculture, et une pâture intensive de longue date, ont pu entraîner l'épuisement du sol.

Les valeurs N_s des unités F20, F31 et F41 étaient environ 1,5 fois supérieures à N_b. Néanmoins le choix s'est porté dans ces cas sur N_b, compte tenu de l'hypothèse selon laquelle cette différence peut être liée au fait qu'avant la sécheresse, les graminées pérennes formaient un composant important de la strate herbacée. Compte tenu de la charge du bétail actuelle et de l'absence d'une gestion de pâturage adéquate, il est peu probable que ces graminées se régénèrent rapidement, même dans le cas d'une bonne pluviosité. Lorsque, en ce qui concerne le bilan d'azote, une nouvelle situation d'équilibre s'installe, celle-ci sera caractérisée par la dominance des espèces annuelles.

C42 est une unité dont la fertilité est indéniablement plus élevée que la moyenne. La cause pourrait en être que l'eau de l'ensemble détritique qui s'y rassemble, entraîne également la matière organique et les alluvions.

La même chose aurait pu se produire pour C41. Le N_s observé ici est cependant beaucoup plus bas que N_b, ainsi que pour les autres unités de l'ensemble détritique à substrat limoneux. La situation de ces paysages avant la sécheresse n'est pas connue ; il n'est donc pas possible d'attribuer cette différence au surpâturage ou à la sécheresse. La forte mortalité des espèces ligneuses et des graminées pérennes dans les aires à accumulation des écoulements parle plutôt en faveur de la dernière hypothèse. C'est la raison

pour laquelle la plupart des parties de cet ensemble n'ont pas été caractérisées sur le dos de la carte (annexe) comme zones dégradées, car cette caractérisation est réservée aux phénomènes liés directement à la présence humaine. Compte tenu du faible rendement d'azote depuis la sécheresse, de grandes parties de cet ensemble pourraient être considérées comme telle.

Situation pendant une année sèche

Conformément à la méthode indiquée dans II.2.2.4 et II.3.6.7, la production d'une année sèche a été déduite à partir d'une année moyenne. Les résultats sont résumés dans le tableau II.22 sous forme de moyenne pondérée par groupe d'unités présentées dans le tableau II.21. La biomasse de la strate herbacée diminue davantage pendant une année sèche que le rendement d'azote ; elle descend jusqu'à un pourcentage de 44 à 70 %, alors que le rendement d'azote n'atteint que 50 à 89 %. Les différences entre une année moyenne et une année sèche sont les plus grandes pour les unités septentrionales, où la différence en pluviosité entre p10% et p50% est également plus importante que plus au sud, et sur les unités où le ruissellement est le plus fort (C). L'humidification des sols pendant une année sèche est ici si peu profonde que la correction se situe dans la partie très pentée de la courbe (figure II.7).

Tableau II.22
Production pendant une année sèche par des pâturages intacts situés sur le trajet dans le centre du Mali, en comparaison avec une année moyenne (entre parenthèses : valeurs d'une année sèche en tant que fraction d'une année moyenne).

	rendement d'azote	strate herbacée		fourrage ligneux
	(kg/ha)	[*N*] (g/kg)	biomasse (kg/ha)	(kg/ha)
ensemble éolien				
- unité E	8,6 (0,83)	9,6 (1,35)	900 (0,61)	80 (0,66)
ensemble détritique				
- unité D	4,5 (0,74)	14,0 (1,67)	300 (0,44)	200 (0,54)
- unité C	3,1 (0,50)	18,0 (1,15)	200 (0,44)	300 (0,68)
ensemble fluviatile				
- unités F	12,6 (0,89)	8,0 (1,35)	1600 (0,66)	400 (0,65)
- unités G	10,0 (0,70)	5,0 (1,00)	2000 (0,70)	580 (1,00)

Surexploitation et dégradation

La situation présentée ci-dessus concerne des pâturages intacts, ce qui est trompeur, comme il a déjà été dit dans le cas des unités C. Le terme utilisé ici concerne l'absence de surpâturage, à moins de qualifier de surpâture toutes les exploitations sur des sols sensibles à l'encroûtement pour une pluviosité moyenne de 250 mm (II.5.6.4). C'est ainsi que la crête à sable vif de D11 (partie 1 de la carte, annexe) n'est pas indiquée comme surpâturée. Même sans exploitation, les parties les plus élevées de telles dunes risquent vraisemblablement de devenir mobiles, compte tenu de la pluviosité moyenne à cet endroit. Le simple fait que cette crête soit déjà visible sur les photos aériennes des années cinquante, alors que la partie mobile couvre une même superficie que pendant les années 1970 en est la preuve.

De grandes parties des diverses unités, notamment dans l'ensemble fluviatile sont nettement dégradées par le surpâturage. Ceci ressort des indications données dans le schéma II.5.

Les conséquences du surpâturage se différencient par substrat. Il faut pour cela faire une différence entre les unités avec une infiltration presque homogène et les unités à forte redistribution par ruissellement. Le premier cas concerne la plupart des unités de l'ensemble éolien, plus D11, D12, F10 et F20. Le surpâturage n'y entraîne pas une diminution de la capacité d'infiltration. *I* reste donc égal. La valeur de f monte cependant à cause d'un plus grand nombre de bétail, mais comme cette présence diminue le risque de feux, la valeur de f ne dépassera pas 0,5. N_b diminue alors dans une année moyenne jusqu'à 5 à 6 kg/ha dans l'extrême nord du trajet et jusqu'à environ 12 kg/ha dans le sud. Sans recherche comparée détaillée, ce phénomène est à peine identifiable pendant le travail sur le terrain, et d'autant moins par l'interprétation des photos aériennes. La situation est différente dans le cas d'une forte exploitation de longue date, quand les graminées C_4 à germination rapide sont remplacées par des dicotylédones C_3 à germination lente (figure I.7). La biomasse plus faible de la strate herbacée va de pair ici avec une teneur plus élevée en azote. Pour une pluviosité annuelle de 400 mm environ, le taux d'azote à la fin de la période de pluies, passe d'environ 7 à 10 g/kg, et la biomasse descend en-dessous de 1000 kg/ha. Ceci est le cas pour les zones dégradées autour des villages, situées notamment sur la partie 2 de la carte.

Dans les zones sensibles par nature au ruissellement, les conséquences du surpâturage sont beaucoup plus graves. Par compactage superficiel du sol, le ruissellement augmente, donc *I* diminue alors que f augmente. Pour une valeur de f de 0,5 et un coefficient de ruissellement qui croît jusqu'à une valeur de 0,6 à 0,7, N_b atteint finalement à peu près 5 kg/ha dans l'ensemble fluviatile. La biomasse moyenne sera alors environ de 250 kg/ha à la fin de la saison de croissance, une situation qui se présente dans certaines parties de la moitié sud du trajet. Tout d'abord, on assiste à une compensation par une production accrue dans les bas-fonds où la strate herbacée et les espèces ligneuses profitent de la concentration accrue de l'eau et donc de l'augmentation des éléments nutritifs. Lorsque le rendement d'azote des surfaces à ruissellement diminue jusqu'à la moitié (ou en-dessous) de celui des pâturages intacts, celui des superficies à concentration des écoulements monte jusqu'au double, c'est-à-dire jusqu'à 25 à 35 kg/ha. Pourtant, certaines unités ont déjà dépassé ce maximum théorique, notamment à proximité des villages où la pression du bétail est la plus élevée et où les espèces ligneuses disparaissent à cause de la coupe du bois. Des inondations de longue durée rendent de plus en plus difficile le développement de la strate herbacée dans les dépressions, alors que les pertes d'azote augmentent fortement par lixiviation et

dénitrification.

Dans l'ensemble détritique, les sols peu profonds de la plupart des unités C et leur extrême sensibilité à l'encroûtement (sols limoneux) sont la cause de la dégradation et de son évolution rapide, déjà lorsque la charge de bétail est faible. De plus, les superficies à concentration des écoulements n'ont pratiquement pas de capacité de stockage pour l'eau. Les différences d'altitude à l'intérieur des unités peuvent atteindre de un à quelques mètres dans l'ensemble fluviatile, mais seulement quelques décimètres dans l'ensemble détritique (à l'exception de D11 et D12). Le résultat est que des unités C surexploitées dans le nord du trajet, présentent des rendements d'azote de 1 kg/ha ou moins ; alors que pour celles du milieu du trajet, il s'agit de quelques kg/ha.

Les unités C41 et C42 constituent une exception : de par leur position par rapport aux autres unités C et de par leurs sols relativement profonds, elles peuvent être comparées à des aires avec accumulation des écoulements de l'ensemble fluviatile. Dans la seconde moitié des années 70, des parties de C42 ont atteint le rendement maximal cité ci-dessus, de 25 à 35 kg/ha ; C41 semblait dépasser de loin ce maximum à cause de la sécheresse et du surpâturage.

La stimulation des espèces ligneuses ne s'effectue pas exclusivement par concentration supplémentaire d'eau dans les bas-fonds. Ce phénomène se produit également lorsqu'une pâture continue intensive, offre peu de possibilités de développement à la strate herbacée. Ce processus d'embroussaillement se manifeste de manière importante sur le trajet, là où à proximité de plaines d'inondation ou de régions irriguées, la nappe phréatique est peu profonde et où la pâture intensive empêche la concurrence pour les éléments nutritifs de la strate herbacée. Ceci est le cas dans les zones de transition des unités E et F vers les unités G (E72/G11, F46/G20, F33/G12, etc. ; voir carte en annexe) et pour l'unité F46 dans son ensemble. La production de la strate herbacée est de peu d'importance dans ces régions, mais la production de pâturage aérien y est importante. L'accessibilité de la broussaille est cependant difficile et de nombreuses espèces d'arbustes sont à peine broutées, surtout où les bovins dominent l'élevage.

Situation avant la sécheresse

Sur la base de données bibliographiques, du schéma II.5 et de la figure I.9, il est possible d'obtenir une vue générale du recouvrement ligneux et de la contribution des graminées pérennes à la biomasse de la strate herbacée, par les espèces avant la sécheresse des années 70. Ensuite, à l'aide des équations II.7 et II.17, il est possible de calculer le rendement d'azote. Après réajustage du taux d'azote indiqué dans la figure II.3 basée sur la contribution des graminées pérennes, qui présentent à la fin de la saison de croissance un taux d'azote de seulement 4 g/kg, il est possible de calculer la biomasse. Ceci a été fait pour les unités du tableau II.21. La production annuelle de fourrage ligneux a également été estimée. Les résultats sont mentionnés dans le .

Pour effectuer le calcul, on s'est basé pour les unités E, D, C et F sur une pluviosité moyenne annuelle de respectivement 400, 315, 385 et 450 mm, ce qui permet la comparaison avec le tableau II.21.

La différence avec les pâturages intacts dans la seconde moitié des années 70 est surtout importante pour les unités C et F. Pour ces deux unités, le rendement d'azote était respectivement supérieur de 2 et de 1,3 fois, la biomasse de la strate herbacée était supérieure de 2,9 et 1,4 fois et la production de pâturage aérien était supérieure de 1,5 et 1,3 fois. Une vérification de ce calcul théorique est uniquement possible pour le ranch de Niono (unités F), situé à mi-chemin de la quatrième partie de la carte (voir annexe), pour une pluviosité moyenne de 550 mm/an : à l'époque la production de la strate herbacée était, sur ces unités, en moyenne de 3500 kg/ha (Boudet & Leclercq, 1970), ce qui correspond bien à la valeur estimée.

Les différences par rapport à il y a 20 ans, sont encore plus grandes à présent, C et F étant notamment les unités fortement dégradées. De plus la mortalité des espèces ligneuses s'est poursuivie au début des années 80. Au ranch de Niono, 2/3 du recouvrement ligneux a été éliminé !

Le tableau II.23 ne reprend pas les unités G, car il n'est pas possible pour ces unités de faire un retour en arrière théorique. Pendant la période d'observation, elles n'étaient pas encore très touchées, mais lors de travaux ultérieurs sur le terrain, il est apparu que la population des graminées pérennes au début des années 80 s'est perdue par suite de sécheresse et de surpâturage.

Tableau II.23
Situation des pâturages intacts pendant une année moyenne, sur le trajet dans le centre du Mali, avant la sécheresse des années 1970.

	rendement d'azote	strate herbacée			arbres et arbustes	
	(kg/ha)	[*N*] (g/kg)	biomasse		taux de recouvrement	fourrage (kg/ha)
			(kg/ha)	pérennes (%)		
ensemble éolien						
- unités E	15,5	7,1	2200	2	6	200
ensemble détritique						
- unités D	9,6	8,5	1100	-	15	500
- unités C	11,9	8,9	1300	8	18	600
ensemble fluviatile						
- unités F	18,0	5,2	3400	30	22	800

Terres cultivées

Le riz est de loin la culture principale dans les zones irriguées (G20), et le mil dans l'agriculture pluviale (notamment E72, E 73, F20, F31, F32 et F33).

La production totale de la biomasse sera généralement un peu plus élevée que pour un champ intact, à cause du travail du sol, l'apport de quelque engrais et une moindre concurrence avec les espèces ligneuses.

Dans la culture actuelle du riz, la production de paddy est en moyenne environ de 2000 kg/ha avec 4000 kg/ha de paille. La production totale d'azote sera largement de 30 kg/ha, donc un peu plus que dans G12, avec lequel on peut le mieux comparer les surfaces irriguées (tableau II.21). Après déduction pour la consommation humaine de l'azote dans le paddy, il reste moins de 20 kg/ha pouvant servir à l'alimentation du bétail. C'est moins que ce qui est disponible en G12, mais environ 1,5 fois plus que ce qui serait disponible sans irrigation (15 à 20 contre 10 à 15 kg/ha ; tableau II.21).

La production de grain de mil sur le trajet est en moyenne de 350 kg/ha et la production de paille de 2450 kg/ha. Le rendement total d'azote sera en général de 16 à 17 kg/ha, environ 4 kg/ha de plus que pour des terres de pâturage. Mais après déduction de l'azote du grain, il reste 2 kg/ha de moins pour la consommation animale.

Partie II.4 et II.5
Partie III
Partie IV, bibliographie et annexes

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens (Partie II.4 et II.5)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

Table des matières
Partie I
Partie II.1 et II.2
Partie II.3

II.4. Evaluation détaillée

II.4.1. Introduction

Dans de nombreux cas, l'évaluation des pâturages est suivie d'une phase au cours de laquelle intervient un choix en faveur de régions plus petites, pour y démarrer certaines activités de développement : comme par exemple la création d'un ranch pour la production de lait et/ou de viande. Ce choix est effectué sur la base des informations recueillies pendant l'évaluation globale ou le cas échéant, pendant l'évaluation semi-détaillée ultérieure.

La planification de ces activités exige une évaluation plus détaillée de cette région plus petite. La méthode d'évaluation est en principe semblable à celle de l'évaluation semi-détaillée, et ne sera donc pas traitée ici. Par contre, les chapitres suivants traiteront brièvement des résultats de l'évaluation d'une telle région : la carte des unités de paysage (II.4.2), la production estimée de la strate herbacée (II.4.3) et la vérification des estimations théoriques (II.4.4). On remarquera que les variations de la production de la strate herbacée d'une année sur l'autre peuvent être telles qu'il est dangereux de baser l'évaluation des pâturages dans les pays sahéliens simplement sur les mesures de la biomasse pendant une année quelconque. La méthode d'évaluation présentée ici tente de parer à ce problème.

De tels programmes de développement s'étendent généralement sur une longue période ; il est ainsi possible d'effectuer des observations à long terme et de procéder éventuellement à des expériences plus poussées. Les résultats permettent de préciser les potentialités de la région et de guider les activités de développement. Les observations et les expériences possibles dans une telle situation sont passées en revue dans II.4.5 .

II.4.2. La carte des unités de paysage

La région prise comme exemple couvre environ 11.000 ha au nord-est de Niono au Mali (carte II.1). Cette région est utilisée comme terrain expérimental du centre de recherche pour l'élevage « Station de Sahel » et est connue sous le nom de Ranch. De nombreux résultats de recherche du projet PPS ont été réalisés sur le Ranch (Penning de Vries & Djitèye, 1982). La carte des unités de paysage est basée sur des photos aériennes prises en 1975. Par ailleurs, ont été utilisées une carte des sols (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 66-67) et une carte de la végétation (Boudet & Leclercq, 1970).

Le Ranch est situé dans le delta fossile du Niger, formé pendant l'Atlanticum, à son climat humide. Pendant cette époque, la région était régulièrement inondée, ce qui a provoqué la formation de dépôts alluviaux, notamment des dépôts d'argile et de limon, mais également des levées alluviales sablonneuses. Les dunes éoliennes formées avant cette période (ergs récents) n'ont pas été érodées pendant l'Atlanticum, mais elles ont été soumises à l'érosion éolienne pendant la période sèche qui suivit, le Subboréal. Pendant le Subboréal cette région a été recouverte par de nouveau dépôts éoliens d'épaisseurs variables ; à certains endroits, d'anciens dépôts alluviaux se situent en surface et en d'autres endroits, ils sont recouverts par des dunes nouvellement formées.

Lors de l'évaluation globale, le Ranch a été subdivisé en deux unités de paysages : $F_{éc}$ et S_a (carte II.2). Sa se compose d'anciennes dunes de sables érodées et aplaties ainsi que de dunes de sables plus récentes et plus prononcées, alors que $F_{éc}$ se compose des dépôts alluviaux recouvert ou non par un amas de sable d'épaisseur restreinte. Lors de l'évaluation semi-détaillée, un nouvel affinement de la répartition a eu lieu, qui distingue six unités de paysage (carte du trajet nord-sud, annexe ; échelle approximativement 1 : 175.000).

En agrandissant l'échelle de l'évaluation détaillée, il est possible d'indiquer plus précisément leur position (carte II.4 ; échelle approximativement 1 : 80.000). C'est ainsi que les dépressions plus importantes à l'intérieur de F20 et F31 ont été cartographiées. Comme elles sont relativement profondes, elles ne se différencient pas de manière significative des dépressions dans F33. C'est pourquoi elles sont désignées dans le texte et dans les tableaux par F33a. L'unité F20 se compose de dunes anciennes érodées, qui forment à présent des sols sablonneux plat à altitude relativement élevée avec une texture relativement grossière. L'unité F31 se compose également de sols sablonneux d'altitude relativement élevée, mais avec un relief prononcé : il s'agit de jeunes dunes de sable, avec un sable d'une texture plus fine. L'amas de sable est tellement épais dans cette unité qu'à aucun endroit les anciens dépôts alluviaux ne s'approchent de la surface. Ceci en opposition à l'unité F33, qui se situe à une altitude moins élevée dans le paysage, car l'amas de sable est moins épais. De plus, sa texture est plus limoneuse ; les anciens dépôts alluviaux se situent à de nombreux endroits juste à la surface, mélangés au fin amas de sable. Les parties situées plus bas sur le terrain, sont subdivisées en unités F41, F42, F44 et F46. F41 se compose de sols limono-sablonneux situés sur des dépôts limono-argileux d'origine alluviale, qui pentent légèrement dans le sens nord-est. F42 et F46 comportent des sols argileux de basse altitude, d'origine alluviale ; F42 présente une texture limoneuse de la couche supérieure, alors que les sols dans F46 présentent une texture argileuse prononcée (vertisol). La présence des espèces ligneuses aurait pu justifier une classification en 3 unités. F42 est dominé par *Pterocarpus lucens*, mais 40 % du

recouvrement total se compose d'autres espèces ; 17 autres espèces ont pu être observées dans plus de la moitié des relevés. Le recouvrement de F46 est formé pour 90 à 95 % de *Pterocarpus lucens*, seules 8 autres espèces sont présentes dans plus de la moitié des relevés. A certains endroits à l'intérieur de F46 et sur les endroits situés de façon analogue, c'est *Acacia seyal* qui est l'espèce dominante ; il en est pratiquement de même pour cette unité sur tout le trajet. Ces endroits recèlent généralement de l'eau de surface stagnant longuement pendant et après la période des pluies. Au Ranch, c'est *Pterocarpus lucens* qui domine de loin, au lieu de *Acacia seyal* , voilà pourquoi l'unité est appelée ici F46a. L'unité F44 comporte d'une part les dépressions avec les sols lourds où les mares se sont formées, et d'autre part un cours d'eau avec une levée alluviale limitrophe, qui forme la limite sud du Ranch. Du point de vue de l'offre de fourrage, cette unité est de peu d'importance, car la partie centrale des dépressions et le cours d'eau sont inondés pendant la période des pluies et quelques temps après. Par ailleurs, la strate herbacée est pratiquement inexistante par suite de la pression d'exploitation près de ces points d'abreuvement à pentes inclinées.

Les caractéristiques principales des unités distinguées ont été résumées une fois encore dans le tableau II.24. Il en ressort que les unités F31, F41 et F42 présentent les plus grandes surfaces. Pour évaluer la disponibilité en eau, on a tenu compte du fait que F33a reçoit de l'eau de ruissellement à partir de F20, F31 et F33. Ces unités perdent également de l'eau en faveur de F42, F44 et F46a. Ces mouvements d'eau s'effectuent partiellement par F41, qui perd également de l'eau en faveur des trois dernières unités mentionnées.

Tableau II.24
Caractéristiques principales des unités de paysage, sur le ranch de Niono (carte II.4)

	texture compte tenu de la profondeur du sol[1)]		superficie		ordre d'altitude[2)]
	0-30 cm	>30 cm	(ha)	(%)	
F20	SL	LS	297	2,7	1
F31	LS	LS	2563	23,3	2
F33	LS	LAS	649	5,9	3
F33a	LS	LAS	264	2,4	4
F41	L	LS	3960	36,0	5
F42	L	LA	1848	16,8	6
F44	LS	LA	781	7,1	7
F46a	A	A	638	5,8	8

1) Selon l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 61-71 : SL = sable limoneux ; LS = limon sablonneux ; LAS = limon argileux sablonneux ; L = limon ; LA = limon argileux ; A = argileux.
2) 1 = altitude la plus élevée ; 8 = altitude la plus basse ; voir coupe sur la carte du trajet nord-sud (annexe).

Carte II.4
Unités de paysage du Ranch Niono.
Voir II.4.2 et carte « Annexe » pour la caractérisation des unités différenciées.

II.4.3. Estimation théorique de la production de la strate herbacée

Lors de cette évaluation détaillée, il s'agit tout d'abord de faire une estimation théorique de la production de la strate herbacée, en tenant compte du taux de recouvrement par les espèces ligneuses, lorsque celui-ci dépasse 15 %. La méthode suit les différentes étapes mentionnées dans II.3.4.

Le tableau II.25 indique les quantité calculées d'eau infiltrée pour les unités de paysage concernées. Les coefficients de ruissellement (R) des unités sont définis dans le projet PPS (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-145). Le tableau II.13 permet d'établir quelle fraction de la pluviosité disparaît hors d'une unité (K_r). Cette estimation s'effectue sur la base de R et, à l'intérieur des unités, sur la base du rapport entre les surfaces avec ruissellement et les surfaces à concentration des écoulements (tableau II.25).

Tableau II.25
Quantités d'eau infiltrée (mm) pour les unités distinguées du Ranch et pour les sous-unités à ruissellement et concentration des écoulements, utilisées pour le calcul.

	R	K_r	SUR_{ru}	$SUR_{dé}$	*I*	I_{ru}	$I_{dé}$
F20	0,20	0,05	0,80	0,20	520	440	850
F31	0,30	0,07	0,80	0,20	510	385	1020
F33	0,40	0,08	0,70	0,30	505	330	790
F33a	(0,40)*	-0,87	-	1,00	1030	-	1030
F41	0,45	0,09	0,75	0,25	500	300	1090
F42, F44, F46	(0,50)*	-0,13	-	1,00	625	-	625

R : coefficient de ruissellement à la base de la répartition à l'intérieur de l'unité (* pas d'estimation de la redistribution à l'intérieur d'une unité, concentration d'écoulements venus d'ailleurs plus importante) ;
K_r : coefficient de pertes, à la base de la redistribution entre les unités ;
SUR_{ru} et $SUR_{dé}$: superficie relative des sous-unités avec ruissellement et avec concentration des écoulements ;
I : infiltration totale dans l'unité ;
I_{ru} et $I_{dé}$: infiltration, spécifiée par sous-unité avec ruissellement et avec concentration des écoulements.

K_r est ensuite utilisé pour calculer quelle quantité d'eau supplémentaire ira alimenter les unités F42, F44 et F46. Ce calcul est fait par estimation de leur surface et de celle de leurs unités avoisinantes présentant

des pertes d'eau. Pour ce faire, il faut dans l'équation II.14 remplacer :
- $SUR_{dé}$ par la surface de l'unité à concentration des écoulements ;

- SUR_{ru} par la somme des superficies des unités avoisinantes à ruissellement ;

- R par la moyenne pondérée des valeurs, K_r des unités avoisinantes à ruissellement ;

- *P* par la pluviosité (éventuellement corrigée par les pertes hors d'une unité par l'intermédiaire de cours d'eau).

En divisant le $I_{dé}$ obtenu par ce *P* (corrigé ou non), on obtient une valeur qui peut être considérée comme la valeur K_r d'une unité avec accumulation des écoulements.

Dans l'hypothèse d'une pluviosité de 550 mm/an pour les années normales (p50%), il apparaît que dans tous les cas, la quantité d'eau infiltrée est supérieure à 250 mm/an : aussi, l'estimation théorique de la production de la strate herbacée est basée sur une croissance limitée par l'azote et l'équation utilisée est celle de N_b (équation II.7). Pour le Ranch, le facteur f dans cette équation est évalué à 0,35 pour la seule strate herbacée. Cette valeur est inférieure à la moyenne admise pour cette pluviosité (figure II.4), mais la pression d'exploitation sur le Ranch est depuis 25 ans inférieure à celle des alentours, car seuls les animaux de la station de recherche peuvent accéder aux pâturages.

Pour chacune des unités, la quantité d'azote dans la biomasse aérienne a été calculée. Les résultats de ces calculs sont indiqués dans le tableau II.26, avec le taux de recouvrement par les espèces ligneuses et le nombre de couches de feuillage estimé (pouvant être déduit du tableau II.4 sur la base des valeurs *I* du tableau II.25).

Tableau II.26
Taux de recouvrement des espèces ligneuses, nombre moyen de couches de feuillage, et estimation théorique de N_b de la strate herbacée dans les années normales (550 mm/an) pour les unités du Ranch, réparties suivant leur disponibilité en eau.

		taux de recouvrement des espèces ligneuses (%)	couches de feuillage (n)	N_b (kg/ha)
F20	$I < P$	14	3	16,5
	$I > P$	20	5	28,4
F31	$I < P$	11	2	14,5
	$I > P$	21	6	32,5
F33	$I < P$	5	2	12,4

	I > *P*	11	4	15,5
F33a	*I* > *P*	34	6	28,5
F41	*I* < *P*	20	2	12,1
	I > *P*	40	6	26,7
F42	*I* > *P*	33	4	17,6
F46a	*I* > *P*	56	4	12,3

I : infiltration ; *P* : pluviosité.

II.4.4. Vérification des estimations théoriques

II.4.4.1. Composition de la strate herbacée

La sécheresse du début des années 70 a occasionné une évolution dans les espèces composant la strate herbacée. Boudet & Leclercq (1970) ont décrit le Ranch avant cette sécheresse. Sur les sols sablonneux (F20, F31 et F33), la strate herbacée était alors dominée par *Diheteropogon hagerupii*. Etaient présents également *Andropogon pseudapricus* et la graminée pérenne *Andropogon gayanus*. Les sols limoneux (F41) étaient dominés par la graminée pérenne *Andropogon gayanus* et aussi par les graminées annuelles *Diheteropogon hagerupii* et *Andropogon pseudapricus*. Les sols argileux (F42 et F46a) étaient dominés par *Pennisetum pedicellatum* et entre autres par *Andropogon pseudapricus* et *Loudetia togoensis*.

En 1975, l'année précédent le début des observations du projet PPS, il apparaissait déjà clairement qu'il y avait eu une évolution dans la composition floristique : les espèces à cycle plus court et les dicotylédones dominaient la végétation, alors qu'*Andropogon gayanus* avait presque entièrement disparu (Breman & Cissé, 1977). Sur les sols sablonneux, *Schoenefeldia gracilis* et *Cenchrus biflorus* dominaient. En outre, il y avait de nombreux dicotylédones telles que *Blepharis linariifolia* et *Zornia glochidiata*. Sur les sols limoneux, la strate herbacée était dominée par les espèces du genre *Borreria*, *Blepharis linariifolia* , *Zornia glochidiata*, *Schoenefeldia gracilis* et *Diheteropogon hagerupii*. Les sols argileux étaient surtout à dominance de *Loudetia togoensis*, de *Pennisetum pedicellatum* et d'espèces du genre *Borreria*. La tendance pendant les années suivantes est décrite dans l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 338) et par Hiernaux (1985). Le Ranch devint le domaine des graminées annuelles, les dicotylédones annuelles se situant à la second place, à l'exception des sols limoneux où il était plutôt question d'une co-dominance. Vers la fin des années 70, *Andropogon gayanus* reprit une certaine importance sur ces derniers sols. Mais les sécheresses de 1983 et 1984 y ont à nouveau mis fin.

II.4.4.2. Composition de la strate ligneuse

A la fin des années 70, le peuplement ligneux sur les sols sablonneux était surtout dominé par *Acacia seyal*, *Sclerocarya birrea* et *Guiera senegalensis* ; *Ziziphus mauritiana*, *Combretum ghasalense* , *Commiphora africana*, *Grewia bicolor* et *Acacia senegalensis* étaient fréquents mais ne contribuaient pas de manière importante au recouvrement. Dans les dépressions de ces sols sablonneux (F33a), on

observait également *Pterocarpus lucens*, en plus de nombreuses autres espèces. Sur les sols limoneux le recouvrement était surtout formé par *Acacia seyal* et *Sclerocarya birrea*, et par *Pterocarpus lucens* sur les parties plus humides. *Combretum micranthum*, *Grewia bicolor*, *Commiphora africana*, *Guiera senegalensis* , *Feretia apodanthera* et *Ziziphus mauritiana* étaient généralisées. Les sols argileux étaient dominés par *Pterocarpus lucens* , et *Acacia seyal* jouait également un rôle dans le recouvrement. *Combretum micranthum*, *Grewia bicolor*, *Guiera senegalensis*, *Feretia apodanthera*, *Boscia senegalensis*, *Acacia seyal* et *Boscia salicifolia* étaient également très présents. Localement, notamment à l'intérieur de l'unité F 46a, le peuplement ligneux était presque entièrement constitué de *Pterocarpus lucens* (Cissé, 1986).

Pendant les années 70, il était question d'une certaine mortalité parmi les espèces ligneuses par suite de sécheresse ; mais ceci a eu peu d'influence sur la composition floristique. Le recouvrement total a peu baissé ; les valeurs dans le tableau II.25, utilisées dans le calcul de *N* b, sont celles de 1979. Les sécheresses de 1983 et 1984 ont provoqué au Ranch, un recul du recouvrement arboré moyen de 24 à 8 % (Hiernaux, 1985).

II.4.4.3. Productivité

Le tableau II.27 compare le rendement d'azote calculé selon II.4.3 (N_b) et les mesures après standardisation, telles que décrites dans II.3.6.5 (N_s). Les valeurs sont des moyennes pondérées par unité, calculées sur la base des sous-unités du tableau II.25. A l'exception de F41, les valeurs N_b et N_s semblent bien concorder. Une des deux valeurs figure entre parenthèses pour indiquer que, selon les directives de II.3.6.5 , il est préférable d'utiliser l'autre valeur pour les estimations de la capacité de charge et de la production animale. Lors d'une utilisation conséquente de ces directives, le choix de valeur N_b s'imposerait dans tous les cas, et ce pour les raisons suivantes :

- dans aucun des cas, à l'exception de F41, toutes les valeurs standardisées ne sont supérieures ou inférieures aux valeurs théoriques correspondantes ;
- la valeur élevée de N_s pour F41 peut être expliquée par la présence avant la sécheresse d'*Andropogon gayanus* dans cette unité.

Le choix de N_b dans ce dernier cas découle de la vision (pessimiste) selon laquelle, compte tenu de la forte charge de bétail dans la région et la protection défectueuse actuelle du Ranch, la régénération automatique de la population d'*Andropogon gayanus* pendant les années à bonne pluviosité est très incertaine.

Dans le cas de F33, le choix a quand même porté sur N_s, car les mesures du rendement d'azote traduisent un gradient par rapport à la distance jusqu'au point d'abreuvement : sous l'influence d'apport de phosphore et la stimulation du ruissellement par la pâture, la légumineuse *Zornia glochidiata* fournit d'année en année, une contribution à la biomasse de loin supérieure à 5 %, sur de grandes parties de cette unité. Parce que l'unité du Ranch est située dans sa totalité à l'intérieur de l'influence du point

d'abreuvement, le choix a porté sur la moyenne du rendement d'azote mesuré (N_s).

Tableau II.27
Caractéristiques de la productivité des pâturages intacts du Ranch de Niono, à la fin des années 70.

	rendement de N (kg/ha)		[*N*] (g/kg)	biomasse de la strate herbacée	fourrage des espèces ligneuses
	N_b	N_s		(kg/ha)	(kg/ha)
F20	18,9	(20,9)[1)]	6,3	3000	800
F31	18,1	(21,0)1)	6,5	2800	800
F33	(15,5)[1)]	17,9	6,6	3400 (2300)[3)]	200
F33a	28,5	- [2)]	5,0	5700	3800
F41	15,7	(24,5)[1)]	6,5	2400 (3800)[5)]	1600
F42	17,6	(15,5)[1)]	5,9 (5,3)[4)]	3000 (2980)[4)]	2400
F46a	12,3	- [2)]	5,9	2100	4000

[1)] préférence pour la valeur qui ne figure pas entre parenthèses ;
[2)] absence de mesures ;
[3)] en dehors de la sphère d'influence du bétail autour du point d'abreuvement ;
[4)] si seulement 1 % en moyenne de légumineuses (voir texte) ;
[5)] si la quasi-absence des espèces pérennes n'est supposée que temporaire.

Le tableau II.27 mentionne également la production moyenne annuelle de biomasse (pouvant être déduite du rendement d'azote) et la production de pâturage aérien, qui découle du tableau II.25. Une partie des chiffres parle d'elle même, mais pour les unités F33, F41 et F42 quelques explications sont nécessaires.

Lorsque F33 est considéré comme une unité où *Zornia glochidiata* exerce « en permanence » une grande influence, il n'est pas exact de maintenir la standardisation relative aux légumineuses. C'est pourquoi cette correction n'a pas été appliquée pour le calcul de la biomasse. La valeur moyenne de ce facteur de correction sur les cinq relevés était de 4,4 kg/ha ; autrement dit, il faut ajouter 4,4 kg/ha à la valeur de N_s (17,9 kg/ha) ce qui donne 22,3 kg/ha. Lorsque le taux d'azote atteint 6,6 g/kg (figure II.3) il en résulte une production de matière sèche de la strate herbacée de 3400 kg/ha. Sur la base du taux d'azote moyen mesuré, soit 7,7 g/kg, on obtient alors 2900 kg/ha. Il s'agit là très certainement d'une sous-estimation, car l'année d'observation était plus sèche que la normale.

En dehors de la sphère d'influence du point d'abreuvement, il faut s'attendre à une production de 15,5/0,0066 = 2300 kg/ha.

Une attitude optimiste à l'égard des possibilités de régénération d'*Andropogon gayanus* dans F41, signifierait qu'il faudrait utiliser la valeur N_s de 24,5. Tant que les espèces annuelles dominent, cela signifie une production de la biomasse de 24,5/0,0065 = 3800 kg/ha. Si *Andropogon gayanus* se mettait véritablement à constituer à nouveau 40 % de la surface de l'unité, la production annuelle de la biomasse serait encore plus élevée, car la graminée pérenne crée une propre réserve d'azote et peut poursuivre la dilution de l'azote (saison de croissance plus longue). Sur 40 % de la surface, le rendement d'azote est à présent de 24,5 × 0,40 = 9,8 kg/ha. Compte tenu de l'exploitation très faible des pâturages, une population d'*Andropogon* pourrait former à la longue une réserve propre tout aussi importante. La disponibilité totale en azote par hectare serait alors de 24,5 + 9,8 = 34,3 kg/ha. Sur 40 % de la superficie avec un rendement d'azote de 19,6 kg/ha, le taux d'azote à la fin de la saison serait de 5,0 à la place de 6,5 g/kg. La biomasse totale serait alors à la fin de saison : (24,5 - 9,8)/0,0065 + 19,6/0,0050 = 2262 + 3920 ~ 6200 kg/ha. De telles productions ont effectivement été mesurées pendant les années 70 sur des restes intacts de végétation avant sécheresse (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 285 ; Cissé & Breman, 1980).

Dans le cas de F42, il y a des problèmes concernant la correction à apporter en fonction de la présence des légumineuses, car seule 1 des 7 relevés atteint la valeur moyenne de 5 % de la production annuelle. Les légumineuses sont même absentes de 5 relevés ; en moyenne, leur contribution à la production de la strate herbacée n'est que de 1 %. Il est bien évident qu'on ne peut dans ce cas se baser sur une seule année d'observation, c'est pourquoi lors des calculs de la production de 3000 kg/ha, la valeur N_b de 17,6 kg/ha est utilisée, basée sur une contribution des légumineuses de 5 % de la production annuelle. Les résultats d'une étude de 1969 peuvent faire supposer que la présence limitée des légumineuses serait plus permanente : la seule légumineuse observée était *Cassia mimosoides*, et ce sous la forme de plantes individuelles peu nombreuses (Boudet & Leclercq, 1970 ; N.B. leur unité A1 = F 42). Si la contribution des légumineuses à la strate herbacée ne s'élève effectivement en moyenne qu'à 1 %, la production est surestimée par N_b. L'équation II.18 permet de calculer le rendement d'azote escompté, à condition de remplacer N_i par la valeur de N_b (17,6 kg/ha), de remplacer B par la biomasse calculée à partir de N_b (3000 kg/ha), de remplacer $[N]_l$ par le taux d'azote des légumineuses à cet endroit (20 g/kg) et de calculer ainsi N_m (15,8 kg/ha). Une utilisation directe de la figure II.3 donnera dans ce cas un taux d'azote trop élevé (II.3.6.6). Au lieu de 5,9 g/kg (5 % de légumineuses), il faudra utiliser une valeur de 5,3 g/kg (1 % de légumineuses ; II.2.2.4). La biomasse reste ainsi pratiquement identique (2980 au lieu de 3000 kg/ha).

II.4.4.4. Variabilité de la production

A diverses reprises, il a été souligné qu'une des motivations principales pour la rédaction de ce manuel,

était la forte dynamique des pâturages dans les pays sahéliens. Les valeurs N_s du tableau II.27 représentent un instantané et donc leur relation par rapport à N_b est assez arbitraire ; ces valeurs dépendent fortement des circonstances pendant l'année d'observation et de l'histoire d'exploitation des sites d'observation. C'est pourquoi les rendements d'azote du tableau II.27 et la biomasse qui en résulte sont également comparées avec d'autres données. Celles-ci concernent d'autres années ou d'autres sites, ou encore ce sont des données logiques du point de vue théorique. Elles illustrent les possibilités de la méthode d'évaluation présentée ici, dans laquelle N_b joue un rôle central. Les exemples décrivent l'influence possible sur le rendement d'azote, de la pluviosité, de la composition floristique de la pâture, de l'exploitation et de l'apport d'engrais. Les valeurs prises en considération sont celles mesurées directement (N_m) et non celles après standardisation (N_s).

Pluviosité

Le tableau II.28 illustre pour les deux unités, la variabilité du rendement d'azote et de la production de la biomasse, en fonction des différences de disponibilité en eau. La plupart des exemples ont trait à des situations où la disponibilité en eau est en-dessous de la moyenne, car les observations ont été faites pendant les années sèches des années 70. Il ressort de ces données, que quelques années d'observation de la pluviosité et de la production, ne conduisent pas à une relation empirique univoque, pouvant être utilisée pour l'extrapolation vers une année normale ou une année sèche. De telles relations empiriques existent (par exemple Le Houérou *et al*., 1988, I.2.4) ; mais pour obtenir une certaine fiabilité, elles exigent un grand nombre d'observations sur une vaste région, ou encore de nombreuses années d'observation sur un même site. Dans le premier cas, la relation n'a qu'une importance limitée quant aux prévisions sur un site donné, tel que décrit ici ; dans le second cas, elle est limitée quant à l'extrapolation géographique. C'est pourquoi la standardisation décrite dans II.3.6.4 a été élaborée. Son utilité apparaît également à partir du tableau, lors d'une comparaison du rendement théorique d'azote de F42, avec les résultats de mesure. Ces derniers sont inférieurs dans tous les cas, même lorsque la disponibilité en eau est presque égale à la moyenne. La faible contribution des légumineuses dans les années d'observation en est une cause importante.

Tableau II.28
Mesures des rendements d'azote (N ; kg/ha) et de biomasse (kg/ha) par rapport à la quantité d'eau infiltrée I ; (mm/an) pour deux unités de paysage sur le Ranch de Niono, en comparaison avec les valeurs d'estimation théoriques.

F33			F42		
I	N	biomasse	*I*	N	biomasse
théorique :					
505	15,5[1)]	2300	625	17,6	3000

mesures :					
190[2)]	11,7	900	205 [2)]	10,6	2300
395	20,4	1500	403	12,0	2700
425[2)]	21,6	2300	457	10,8	2800
467	31,0	2100	457	11,5	1780
524[3)]		1500-3000	487[2)]	16,1	3500
555[2)]	19,8	3900	524 [3)]		5000
568[4)]		2000	576	9,0	2300
			617[2)]	12,1	3300

[1)] = N_b

[2)] obtenu par suppression des pluies ou par pluies supplémentaires, Cissé, 1986 ;
[3)] Boudet & Leclercq, 1970 ;
[4)] Breman & Cissé, 1977.

Composition floristique

La dominance des légumineuses peut entraîner des rendements d'azote importants. La strate herbacée se compose généralement d'un mélange d'espèces, et dans le cas de forte dominance d'une espèce, il est dans la pratique difficile, sinon impossible, de dire si un écart du rendement d'azote par rapport à la moyenne, est dû à cette espèce dominante ou aux conditions qui ont engendré cette dominance.

Sur les substrats sablonneux du Ranch (F20, F31 et F33), avec des valeurs N_b entre 15 et 20 kg/ha (tableau II.27), *Zornia glochidiata* domine souvent dans le cas d'une forte exploitation. Aux lieux qui ne se situent pas directement dans la sphère d'influence d'un point d'abreuvement, ceci va de pair avec des rendements d'azote qui se situent de 5 à 10 kg/ha au-dessus de la moyenne. Les monocultures de légumineuses *Zornia glochidiata*, *Alysicarpus ovalifolius* et *Cassia mimosoides*, obtenues par un travail du sol et l'ensemencement, ont donné sur F20 et F33 des rendements d'azote de 45 kg/ha en moyenne (Penning de Vries et Djitèye, 1982 : p. 299).

Là où *Zornia* domine dans les pâturages loin des points d'abreuvement, la disponibilité en eau est faible. La végétation y démarre tardivement, ce qui, parallèlement à la faible disponibilité en azote, pourrait expliquer la fixation limitée de l'azote.

L'influence de la composition floristique sur le rendement d'azote a déjà été traitée dans II.3.6.5. Il y était également question d'un rendement d'azote relativement élevé pour une dominance de *Cenchrus biflorus*. La dominance de différentes sortes de graminées peut aller de pair avec d'énormes différences dans le rendement d'azote. Un cas est mentionné dans II.4.4.3 d'un rendement d'azote de 34 kg/ha dans le cas d'une dominance d'*Andropogon gayanus* sur F41. Cette unité pourrait également être dominée par

Microchloa indica et alors le rendement d'azote serait négligeable. A nouveau les caractéristiques des espèces et les facteurs d'environnement sont étroitement imbriqués : *Andropogon* profite d'une disponibilité en eau relativement élevée et d'une faible charge d'exploitation pour créer sa propre réserve d'azote ; *Microchloa* ne peut s'installer et se maintenir qu'aux endroits où d'autres espèces ont peu de chance de s'installer à cause du compactage superficiel du sol (par exemple à cause d'une forte exploitation).

La concurrence entre la strate herbacée et les espèces ligneuses (III.2.6) explique la variation dans le rendement d'azote de la strate herbacée, conséquence des différences dans le taux de recouvrement ligneux. C'est peut-être la raison pour laquelle Boudet et Leclercq (1970) ont abouti pour leur unité Ca1 (correspondant environ au F33 du Ranch) à une estimation de la production inférieure aux valeurs mesurées figurant au tableau II.27. La sécheresse, la pâture et la coupe avaient réduit le taux de recouvrement ligneux jusqu'au niveau de 5 à 11 % à la fin des années 70 (tableau II.25). Avant la sécheresse, ces valeurs étaient vraisemblablement deux fois plus élevées (figure I.9).

Le fait que ce soit F42 qui présente la valeur N_s la plus basse de toutes les unités étudiées sur le Ranch (tableau II.27) ne peut se comprendre qu'à partir du taux de recouvrement élevé des arbres (tableau II.25 ; F46a présente un recouvrement plus élevé mais il n'y a pas eu de mesures de rendement d'azote). La différence avec les autres unités est encore amoindrie par la correction (déjà mentionnée) apportée, compte tenu du faible taux de légumineuses. Les rendements d'azote mesurés et non standardisés s'élevaient en moyenne à moins de 12 kg/ha, alors que pour la totalité des autres unités, elle était de presque 22 kg/ha. Et cela alors que le sol présente le plus haut taux d'azote (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 64) et que la disponibilité en eau est surpassée seulement par celle de F33a (tableau II.25). Dans le cas de coupe des arbres et des arbustes, le rendement pourrait, dans un premier temps certainement, s'élever à 30 kg/ha. Si le terrain est maintenu à découvert, ce rendement s'abaissera peu à peu vers 20 à 25 kg/ha compte tenu de la faible pâture actuelle (suivant équation II.7).

Pâture

La pâture peut influencer le rendement d'azote aussi bien positivement que négativement ; mais c'est le dernier cas qui est de loin le plus fréquent. Cet effet est occasionné par une valeur de f plus élevée (au maximum environ 0,6) et par un ruissellement plus important, notamment sur l'unité limoneuse F41, sur les levées alluviales dans F44 et sur l'unité limono-sablonneuse F33 ($R \geq 0,6$). L'équation II.7 fait alors apparaître des rendements d'azote de 4 kg/ha ou moins. Voilà la situation réelle autour du point d'abreuvement de F44, ainsi que pour F41 et F33 en dehors du Ranch, où la pression d'exploitation est forte (II.3.7). Si en plus, il est question d'embroussaillement, la strate herbacée disparaît presque entièrement et le rendement d'azote s'approchera de 0.

Localement, le rendement d'azote peut augmenter par apport de fumier et stimulation des légumineuses, à condition que la tendance à l'encroûtement du sol ne soit pas telle que le ruissellement accru camoufle totalement la forte disponibilité en éléments nutritifs. Djitèye (1981) indique pour le flanc est du Ranch,

près d'un point d'abreuvement, un rendement d'azote de 41 kg/ha. Lorsque le ruissellement n'augmente pas ou à peine (substrat sablonneux, plat) et qu'une espèce peu appétible s'installe, telle que *Cassia tora*, les valeurs peuvent encore être supérieures de 10 à 20 kg/ha.

Apport d'engrais

Les rendements d'azote mesurés dans une région limitée telle que le Ranch peuvent donc varier entre 0 à 60 kg/ha, en fonction de l'année et du site. Les rendements de matière sèche varient ainsi entre 0 et 6000 kg/ha.

L'apport d'engrais chimique peut provoquer des valeurs encore plus élevées. Le seul engrais phosphaté sur F20 a permis d'obtenir après introduction de *Cassia mimosoides* un rendement d'azote de 100 kg/ha. Avec NPK ce résultat a même été dépassé sur F42 en l'absence de légumineuses : 158 kg/ha. Certaines productions s'élevaient jusqu'à 12.000 kg/ha (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 233 et 299).

Ces derniers exemples de variabilité dans le rendement d'azote ont été ajoutés à titre exhaustif. Ils ne donneraient pas lieu, lors de l'évaluation, aux problèmes évoqués dans l'introduction de ce sous-paragraphe. Ils prouvent une fois de plus que l'eau est loin d'être dans tous les cas le facteur le plus limitatif, ce qui explique pourquoi la relation disponibilité en eau/production du tableau II.28 présente une telle dispersion.

II.4.5. Exploitation, gestion et aménagement des pâturages

A la suite de l'évaluation présentée dans II.2 et II.3 , la recherche peut apporter une connaissance plus approfondie de la manière d'optimaliser l'utilisation des pâturages. Dans de nombreux cas, une année d'observation n'y suffit pas. Trois domaines de recherche sont esquissés ci-après :
- affinement dans l'estimation de la qualité des pâturages (II.4.5.1) ;
- recherche des paramètres déterminant la potentialité pour la production animale (II.4.5.2) ;
- justification des conseils pour la gestion et l'amélioration des pâturages (II.4.5.3).

II.4.5.1. Précision sur la qualité des pâturages

Compte tenu du rôle central de N_b dans la méthode d'évaluation (II.3.4), il est très important de procéder, par des mesures, à une évaluation précise des paramètres f (fraction moyenne de N dans la biomasse aérienne qui se perd annuellement) et *I* (quantité d'eau infiltrée). Pour f, ceci concerne notamment les pertes par pâture et par le feu, mais les pertes par volatilisation et par l'herbivorie autre que celle du bétail, pourraient également être déterminées avec plus de précision en fonction du type de pâturage (substrat et espèces dominantes). Ainsi il existe des indications nettes selon lesquelles l'activité des termites est relativement faible sur des sols à texture grossière. Les espèces C_3 courent beaucoup plus de risques que les espèces C_4 d'être perdues pour le bétail à cause des dégradations dues aux

insectes, moisissures, etc., surtout lorsque ces dernières sont des graminées. Les graminées par contre, sont plus soumises au risque de feux. Le feu se répand plus facilement sur les sols sablonneux à strate herbacée homogène que sur des sols à recouvrement hétérogène, à cause de la redistribution de l'eau par ruissellement et concentration des écoulements.

La valeur de *I* peut être précisée par des mesures de la vitesse d'infiltration et de ruissellement, et dans le cas de sols peu profonds, par détermination de la capacité de stockage d'eau du sol, afin de mieux quantifier les pertes par percolation (Hoogmoed & Stroosnijder, 1984 ; Casenave & Valentin, 1990). Par ailleurs, il est possible, grâce aux mesures du rapport de surface entre les régions avec ruissellement et les régions à concentration des écoulements, de quantifier avec plus de précision la concentration des écoulements.

L'extrapolation à partir d'une année quelconque pour une année normale et pour une année sèche s'effectue, il est vrai, sur la base du rendement d'azote mesuré par unité de paysage, mais cette valeur est standardisée par un rapport entre le rendement d'azote et la profondeur d'humidification du sol, basé sur 2 à 4 ans d'observations à 30 endroits différents (II.3.6.4). Les grandes différences entre les unités pour ce qui concerne le taux d'azote du substrat, la vitesse de minéralisation et la répartition de l'azote sur le profil, donnent lieu à de grands écarts entre les données. Sans déterminer tout ces facteurs séparément, la résultante (rendement d'azote en rapport avec la profondeur d'humidification du sol) peut être obtenue à condition de déterminer avec exactitude la texture du profil, et de mesurer pendant quelques années le rendement d'azote et *I*. La profondeur de l'humidification du sol peut alors être calculée (et éventuellement mesurée). Des années peuvent se passer avant qu'il y ait eu suffisamment de variations dans la pluviosité pour établir un rapport précis. La méthode utilisée par Cissé (1986) peut y remédier : il s'agit, à l'aide d'irrigation, de simuler des pluies supplémentaires, ou bien d'annuler des pluies en recouvrant la terre (tableau II.28).

La profondeur d'humidification du sol a été calculée pour les deux unités F42 et F33, et le rapport avec N_i est représenté dans la figure II.16. Il ressort de cette figure, que l'azote facilement minéralisable en F42 est beaucoup plus présent en surface que dans F33, alors que la disponibilité maximum pour F42 est déjà atteinte pour 50 cm d'humidification de sol, contre 200 cm dans F33.

Figure II.16

Rapport entre le rendement d'azote (standardisé pour les légumineuses ; N_i) de la strate herbacée, et la profondeur maximum d'humidification du sol, pour deux unités du Ranch de Niono. Le rendement d'azote est mentionné par des flèches pour une année moyenne (p50%) et pour une année sèche (p10%).
× : F42 ; [rond noir] : F33.

La figure représente également le rendement d'azote pour une année moyenne. Dans F42 ce rendement est atteint pour une moindre profondeur d'humidification que dans F33, mais pour un *I* plus élevé (respectivement 625 et 505 mm/an), car F42 possède un sol plus lourd et une concentration des écoulements, alors que F33 présente du ruissellement. Il aurait été utile de disposer d'un ou de plusieurs sites avec une disponibilité en eau plus élevée pour déterminer le maximum. L'extrapolation graphique

effectuée n'aurait alors pas été nécessaire.

Alors qu'au cours d'une année moyenne, le rendement d'azote sur F33 est beaucoup plus important que sur F42, il n'y a pratiquement pas de différence pour une année sèche (figure II.16).

Il serait possible de déterminer expérimentalement sur une période de plusieurs années, si l'azote constitue en effet le facteur limitatif pour la production des pâturages, et dans ce cas le rendement d'azote peut alors être utilisé comme fil conducteur dans l'évaluation des pâturages. Il faudrait pour cela inclure des analyses de phosphore, dans les expériences décrites ci-dessus, et d'autre part effectuer des expériences d'application d'engrais. Pour ce dernier point, on peut référer à l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 212-218). Les résultats des expériences décrites démontrent qu'au Ranch, l'azote est plus limitatif que le phosphore : l'apport du seul engrais azoté entraîne une plus forte augmentation de la production que l'apport d'engrais phosphaté. Le phosphore est beaucoup moins mobile que l'azote ; c'est pourquoi au début de la saison de croissance c'est le phosphore qui est limitatif. Grâce au développement du réseau de racines, ce manque est supprimé et le rapport P/N croît donc au cours du cycle de croissance.

Il découle des expériences de Cissé (1986), que la disponibilité en azote diminue de F41 —> F33 —> F42. Ceci ressort également des valeurs N_s figurant au tableau II.27 et de la figure II.16. Par contre, la disponibilité en phosphore diminue de F41 — > F42 —> F33 ; le rendement maximum de phosphore, pour une profondeur d'humidification suffisante du sol, apparaît supérieure à 3 kg/ha pour F41 et F42, et d'environ 2 kg/ha pour F33. Compte tenu du rendement d'azote, le manque relatif d'azote est donc le plus élevé sur F42, et c'est aussi sur cette unité que le rapport P/N à la fin de la saison de croissance (pour une biomasse identique) est le plus élevé. Pour une production de matière sèche de 2000 kg/ha, ce rapport est de 0,15, de 0,10 et de 0,08 pour respectivement F42, F41 et F33 ; pour 3000 kg/ha, il est de 0,18, de 0,14 et de 0,10. Le rapport P/N qui va en augmentant pour une biomasse plus élevée à la fin de la saison de croissance, confirme l'hypothèse précitée concernant l'importance du développement des racines pour la disponibilité en phosphore. Lorsque la biomasse totale à la fin de la saison de croissance augmente de 1000 à 4000 kg/ha sur F33, le rapport P/N y augmente de 0,07 à 0,12, et celui de F42 passe de 0,14 à 0,21.

Il en résulte que le seul apport d'engrais phosphaté sur F42 n'exerce pratiquement pas d'influence positive sur la production : la production n'augmente même pas de 20 %, alors qu'elle augmente d'environ 50 et 60 % pour F41 et F33. Le rendement d'azote n'augmente également que très faiblement suite à l'apport d'engrais phosphatés, au maximum 1 à 3 kg/ha (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 206). Aussi n'est-il pas étonnant que les légumineuses ne soient pas stimulées par le phosphore, car le phosphore n'est pas vraiment limitatif. Par contre, il est étonnant de constater, comme souligné dans II.4.4.3 et II.4.4.4, que les légumineuses sont à peine présentes sur F42, du moins pas dans la strate herbacée, alors que la contribution des légumineuses est la plus élevée là où sur F33 la disponibilité en phosphore semble la plus basse (II.4.4.4). Du point de vue absolu, tout comme du point de vue relatif, c'est l'inverse qui s'applique pour les espèces ligneuses : sur F42 le taux de recouvrement par les arbres

et arbustes légumineux est de 21 % pour un recouvrement total de 33 % ; pour F41 la valeur est de 14 et 24 % et pour F33 de 2 et 7 %.

La composition floristique doit retenir l'attention non seulement pour ce qui précède, mais également d'une manière générale, car elle influence l'estimation de la qualité - sur la base de N_b (ou N_s) - (II.2.2.4). Dans une certaine mesure, le rendement d'azote en dépend également (II.3.6.5), alors que l'appétibilité peut influencer l'ingestion de fourrages. La contribution des divers groupes d'espèces aux différentes unités du Ranch, ne diffère pas en moyenne de l'image générale du schéma II.6 (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 331). Pourtant, il y a des différences suivant que la graminée annuelle à germination rapide d'une unité telle que F42, est *Andropogon pseudapricus*, *Diheteropogon hagerupii* ou *Loudetia togoensis*. Une fois mûre et séchée, cette dernière espèce est non seulement peu appréciée par le bétail, mais la durée du cycle et donc la durée de la période verte, va en diminuant de l'un à l'autre dans l'ordre suivant : *Andropogon pseudapricus*, *Diheteropogon hagerupii* jusqu'à *Loudetia togoensis* . Ainsi les dicotylédones sur F41 peuvent aussi bien concerner l'espèce *Blepharis linariifolia* à germination rapide, qui en l'absence de chute de graines forment une source bienvenue de protéines en saison sèche, que les *Borreria spp*. à germination lente beaucoup moins appréciés. Sur une unité telle que F20, la graminée annuelle dominante à germination rapide peut être *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus* et *Diheteropogon hagerupii*, chacune avec ses avantages et désavantages spécifiques.

Dans les diverses unités, d'une année sur l'autre, la présence d'année en année de ces espèces, varie plus encore que celle des groupes d'espèces déjà traités, soit : légumineuses et pérennes (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 338). Tant que les recherches sur plusieurs années ne font pas apparaître un caractère relativement permanent de la dominance d'une espèce, il est peu utile de répercuter cette dominance sur l'estimation de la potentialité d'un pâturage. Et même lorsqu'il est question de la dominance stable d'une espèce, ceci n'a pas nécessairement des conséquences directes pour l'estimation faite précédemment en matière de production et de qualité, bien qu'il y ait là une raison d'y accorder une attention particulière. Ceci vaut également pour la différence du nombre d'unités entre l'évaluation du Ranch présentée dans II.4.3.1, et celle de la CIPEA : respectivement 8 et 27 (Bille, 19**). Le CIPEA arrive à ce résultat élevé sur la base des populations d'espèces ligneuses : 9 groupes de base en combinaisons diverses. Si des recherches sur plusieurs années concluaient à des différences significatives dans la disponibilité en éléments nutritifs pour la végétation, ou dans la production animale entre les unités déterminées par CIPEA, il faudrait décider d'une nouvelle subdivision des 8 unités distinguées ici.

Finalement, l'attention est attirée sur la nécessité de déterminer avec précision à l'aide de mesures, la production des espèces ligneuses. Ceci peut se faire par exemple, comme suggéré dans l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 295) et Cissé (1980), sur la base de paramètres tels que circonférence des troncs des sujets des espèces les plus importantes. Compte tenu des lacunes dans les connaissances à ce propos, il est utile de tenir compte du rapport entre la pluviosité et la production.

II.4.5.2. Autres paramètres du potentiel d'exploitation

Le chapitre suivant (II.5) et III.3 indiqueront comment à partir des évaluations (II.2, II.3 et II.4 ; aboutissant à une estimation de la production de la biomasse et de son taux d'azote à la fin de la saison de croissance), il est possible d'estimer les possibilités de la production animale et l'occupation maximale des pâturages. Une estimation plus précise requiert de plus amples informations quant à la qualité et l'évolution des fourrages au cours de l'année, et quant aux possibilités d'exploitation de la biomasse. Parallèlement, une présence de plusieurs années dans une région permet de vérifier les estimations théoriques de la production animale par rapport à l'occupation des pâturages et de vérifier ainsi l'évaluation en tant que telle.

Paramètres de qualité

Bien que le taux d'azote et la digestibilité du matériel végétal produit déterminent en premier lieu la qualité d'un pâturage, il n'est pas exclu qu'il existe d'autres micro et/ou macro-éléments, ou même des vitamines qui localement ne sont pas présents en taux suffisant pour le bétail. Ceci est certainement vrai pour le phosphore ; c'est la raison pour laquelle il avait été suggéré d'intégrer cet élément dans les analyses standard. Il est conseillé d'examiner également le taux des autres éléments (II.5) lorsqu'il y a des signes spécifiques de déficits (Boudet, 1978) ou lorsque la production animale est loin en-dessous du niveau dérivé de l'évaluation. Pour diverses régions, ceci a d'ailleurs déjà été réalisé (IEMVT [1987]a, b et c).

Il est également souhaitable de déterminer la digestibilité avec plus de précision que ne le permet la méthode du taux d'azote (tableau III.13). Van der Meer et Breman (1991) démontrent que le rapport est différent pour les divers groupes d'espèces qui ont été distingués lors de l'évaluation (II.3.5.2), mais il ne s'agit là que d'une explication partielle du phénomène de dispersion constaté dans la pratique autour de la ligne de régression utilisée (figure III.20). Une estimation plus précise de la digestibilité peut être effectuée, à condition de déterminer également le taux de cellulose brute des groupes d'espèces et des parties de plantes (III.3.1). Pour une précision encore plus grande, il faudra des analyses de digestibilité *in vitro* ou *in vivo*.

Profil de qualité

La disponibilité en azote étant vérifiée, sinon fixée par la détermination du taux d'azote dans les différents groupes d'espèces (II.3.5), il est possible de tenir compte non seulement du taux d'azote moyen, mais de se former une idée de la part relative des fractions à taux différent (= profil de qualité). Globalement le taux d'azote diminuera dans l'ordre suivant : légumineuses, feuilles d'arbre, espèces C_3 , dicotylédones C_4, graminées annuelles C_4, graminées pérennes C_4. Pour pouvoir se représenter la composition du menu, lors d'une différence de sélectivité suivant les espèces de bétail, il faut opérer une subdivision quantitative entre les tiges, les feuilles et les graines et fruits. Aussi bien dans ce cas, que dans le rapport cité entre la digestibilité et le taux d'azote (compte tenu ou non du taux de cellulose brute), il faut être conscient du fait que les mesures effectuées au cours d'une année quelconque sont de peu d'utilité. Elles sont utiles s'il s'agit d'expériences où la production animale est suivie en détail, de

manière à déterminer si cette production peut être expliquée à partir de la situation fourragère. Dans d'autres cas, les mesures directes n'ont qu'une valeur locale et temporaire, compte tenu de la dynamique des pâturages. Il est plus utile alors de faire une synthèse des connaissances existantes pour des groupes d'espèces importants, de les vérifier et de les expliciter, comme par exemple la quantification du profil de qualité d'*Andropogon gayanus* et la production de graines des graminées par rapport aux dicotylédones (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 286 et 119-121). Une ébauche de synthèse est présentée dans la partie IV.

Figure II.17
Taux d'azote moyen de la biomasse aérienne de la strate herbacée, en tant que fonction de la pluviosité annuelle au cours de divers mois de l'année.

Evolution de la qualité

La qualité des fourrages des pâturages se modifie fortement au cours de l'année. D'une part la qualité est liée aux stades de croissance, et d'autre part elle est influencée par la mortalité, les atteintes sélectives et les dégradations pendant la saison sèche. A partir d'une évolution moyenne de la qualité, il est possible, sur la base du profil de qualité à la fin de la saison de croissance, de se former une image de la qualité au cours de l'année. La figure II.17, par exemple, donne l'évolution globale du taux d'azote de la strate herbacée par zone climatique. L'évolution de la qualité du fourrage des espèces ligneuses a déjà été indiquée dans tableau II.9. Pour autant que les caractéristiques d'espèces jouent un rôle dans cette évolution, la partie IV donne des indications plus détaillées. Les données en provenance de tiers ont également été prises en considération, telles les données que Traoré (1978) a réuni pour le delta du Niger. L'évolution moyenne de la qualité des pâturages dans le centre du Mali, en l'absence de feux et de pâture (sélective !) est représenté dans la figure II.18, le tableau I.22 a présenté pour une zone plus étendue l'évolution du taux d'azote par mois. L'évolution y figure par zone climatique pour la totalité de la biomasse des pâturages naturels, espèces ligneuses comprises.

Figure II.18
Evolution annuelle de la biomasse par catégorie de qualité de fourrage (taux d'azote en g/kg), en l'absence de feux et de broutage, pour quatre zones de pâturages.

Les différences entre les unités de paysage sont cependant telles qu'il faut disposer pour chaque unité de paysage de mesures de l'évolution de la qualité pendant la saison de croissance pour pouvoir estimer de façon précise la production animale possible. La figure II.19 illustre ceci pour deux cas extrêmes au Ranch (F20 et F42), pour ce qui concerne le taux d'azote. Dans ce cadre il est conseillé d'accorder une attention particulière à l'évolution de la disponibilité et de la qualité du fourrage des espèces ligneuses dans le temps, et à la repousse des graminées pérennes par rapport à leur biomasse produite pendant la saison des pluies et de son sort (pression d'exploitation et époque). Notamment pour les moutons, il faut tenir compte du fait que toutes les graines et feuilles tombées ne sont pas perdues en tant que fourrage.

Figure II.19

Evolution du taux d'azote de la biomasse aérienne pour les pâturages (sans fertilisation) des unités F20 (——) et F42 (- - - -) du Ranch, au cours de la saison des pluies.
Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 200 .

Sélectivité

La qualité du menu du bétail ne correspond pas à la qualité moyenne de la biomasse. Ces deux valeurs ne se rapprochent que lorsque l'occupation des pâturages est telle que « toute » la biomasse est utilisée. Bien entendu, la sélection du bétail fait qu'avec le temps, l'évolution de la qualité du menu s'écarte de la qualité de la biomasse, tant que cela est possible. Dans II.5 et III.3, l'attention est attirée cependant sur le fait que la qualité moyenne, à l'exception de celle des pâturages dans le nord du Sahel et de régions à fort ruissellement, est tellement basse qu'il est impossible d'y prévoir un élevage viable lorsque la charge de bétail devient tellement grande que toute la biomasse doit être utilisée. La sélection est donc absolument nécessaire.

L'IEMVT a accordé beaucoup d'attention à un aspect important de cette sélectivité : « l'appétibilité » des espèces. Ce concept est en grande partie relatif, et il est donc plus indiqué de parler de préférence de diverses espèces de bétail. Pourtant, il existe des caractéristiques de plantes qui donnent à l'appétibilité un caractère plus absolu. Diagayété (1981) souligne le rapport entre le taux de tanin et la digestibilité. Ce rapport rend près de 85 % du fourrage des espèces ligneuses inintéressant, du moins pour les bovins. Les épines représentent également un obstacle pour différentes espèces de bétail, et ce toute l'année - comme c'est le cas pour de nombreuses espèces ligneuses - ou pendant la fructification et la maturation, comme pour *Cenchrus biflorus*. Il a déjà été dit que pour les moutons, la chute des graines représente le moins de perte de fourrage de qualité. Le fait que les Peuls dénomment de la même façon de nombreuses espèces différentes de plantes rampantes, pourrait être lié à la différence d'accessibilité pour les bovins et les moutons. Et puis il faut citer la toxicité : le danger d'une ingestion trop importante par le bétail de *Zornia glochidiata* à un stade jeune, est notoire, tout comme la toxicité d'une espèce comme *Cienfuegosia digitata*. Il peut donc être important de déterminer pour une région donnée quelles espèces de plantes offrent l'énergie et les protéines disponibles.

Les différences dans la composition floristique de la strate herbacée des diverses unités du Ranch ont déjà été soulignées dans II.4.5.1. Pour les espèces ligneuses également, il importe de considérer les espèces individuellement. Le taux d'azote de cette catégorie est en effet davantage déterminé par la génétique que par la disponibilité relative en eau et en éléments nutritifs, comme c'est le cas pour la strate herbacée. Les légumineuses parmi les espèces ligneuses n'ont pas nécessairement un taux d'azote plus élevé que les autres familles (voir partie IV). Le taux de tanin est également fortement lié à l'espèce. Il ressort de la partie IV que de nombreuses espèces *Acacia* présentent un taux élevé de tanin, contrairement à *Pterocarpus lucens*. La contribution des diverses espèces de légumineuses au recouvrement par les espèces ligneuses, a de grandes conséquences quant il s'agit de transposer la couverture en disponibilité en fourrage pour les bovins. A cet égard au Ranch, c'est F46a qui présente vraisemblablement le plus d'intérêt pour les bovins (tableau II.25). Le degré de recouvrement total par

les espèces ligneuses y est de 56 %, dont 53 % de *Pterocarpus lucens*, 1 % d'autres légumineuses et 1 % de divers. Pour F42, le degré de recouvrement par *Pterocarpus lucens* est de 17 %, et celui des autres arbres et arbustes légumineux de 4 % ; pour F41, ceci est respectivement de 5 et 9 %, et pour F33 de 0 et 2 %.

Mis à part ces aspects d'appétibilité de caractère plus ou moins absolu, il est suggéré dans II.5 et III.3 de considérer la sélectivité comme une préférence allant vers la qualité, préférence qui apparaît plus de la compétence des chèvres et des moutons que les bovins. Pourtant, Diallo (1978) a montré que même les bovins peuvent sélectionner un menu qui est qualitativement supérieur à la composition moyenne des pâturages. Pendant leur transhumance entre le delta du Niger et le sud-est mauritanien, une région dans laquelle pendant la période d'observation 10 à 50 % (en fonction de l'endroit) de la production annuelle était consommé par le bétail, les zébus ont réussi à ingérer une ration d'un taux moyen d'azote de 13 g/kg alors que le taux moyen de l'offre était de 9 g/kg. Le taux de phosphore du menu était de 1,5 g/kg alors qu'il était de 1,2 g/kg pour le total de la biomasse, et la digestibilité était de 55 contre une moyenne de 45 %.

Les connaissances existantes en matière d'hétérogénéité dans l'espace de la qualité de la biomasse et de son évolution dans le temps, permettent d'estimer le taux d'azote du menu. Cette estimation tient compte d'une part de la biomasse présente, et d'autre part du besoin en nourriture compte tenu de l'occupation des pâturages ou du niveau de production souhaité.

La figure II.20 présente la fraction de la biomasse totale qui présente un certain taux d'azote souhaité pour un taux moyen donné. Cette figure est basée sur des données de terrain, mais repose nécessairement sur la simplification selon laquelle le bétail peut sélectionner chaque taux d'azote par combinaison de parties de plantes de taux différents. Dans la pratique, il peut s'avérer utile de revenir à la répartition des rapports de poids des composants à taux d'azote divers qui composent la végétation (profil de qualité). L'exploitation des champs après la récolte en est l'illustration la plus évidente. Bien que la qualité moyenne des restes de récolte soit très basse et plutôt moins bonne que celle des pâturages au même moment, les bovins aussi parviennent à un gain de poids dans les champs. Les graines grossiers comme le mil et le sorgho permettent notamment une sélection de feuille, dont le taux d'azote est plus que le double de la qualité moyenne de la paille. La biomasse des limbes sera la plupart du temps inférieure à 10 % de la quantité totale de paille ; puis il y a des gaines de qualité bien inférieure, qui représentent environ 15 % du poids de la paille. Une sélection efficace identique est possible pour une graminée telle qu'*Andropogon gayanus* : d'abord au moment de la floraison en octobre-novembre, lorsque les bovins aussi sont en mesure de sélectionner les inflorescences et les feuilles et de laisser les tiges, puis au moment des repousses, à condition qu'il y ait des feux. Il en va de même pour les graminées pérennes grossières des plaines d'inondation. Après les feux, la quantité de fourrage de qualité acceptable de *Vetiveria nigritana* pouvant être sélectionnée par les bovins, était quatre fois supérieure à celle pouvant être sélectionnée en l'absence de feux (Breman *et al.*, 1978). Par contre, pendant la saison sèche, après la chute des graines, une sélection efficace par les bovins apparaît à peine possible pour les graminées annuelles (Diallo, 1978). Pourtant, même les bovins parviennent à opérer une sélection de qualité dans une région avec uniquement des espèces annuelles, en tirant parti de l'hétérogénéité du

paysage. Les recherches du CIPEA sur le Ranch de Niono ont montré qu'au début de la saison sèche, il y avait une forte préférence pour les unités avec beaucoup de *Zornia glochidiata* , telle que F33 (Hiernaux, communication personnelle). Lorsque le bétail était maintenu tout au long de l'année à l'intérieur d'un enclos d'une seule unité, rendant tout choix impossible, il s'est avéré qu'aucune unité du Ranch ne fournissait une qualité fourragère suffisante pour permettre un gain de poids nette sur une période d'un an. Même une unité comme F46a, à forte présence de *Pterocarpus lucens*, ne le permettait pas, alors que la charge de bétail n'était pas telle que le total de la biomasse soit limitatif (Diarra, 1983).

Figure II.20
Fractions supérieures de la biomasse qui pour un taux d'azote moyen donné, répondent à la norme de 7 g/kg (- - - -) ou 8 g/kg (——).

Lorsque les recherches s'étendent sur plusieurs années, il importe de déterminer la possibilité de sélectionner des fractions de bonne qualité pour les diverses unités de paysage, ainsi que de déterminer les préférences des bovins pour les espèces et les pâturages. Cette préférence n'est pas nécessairement le meilleur et l'unique critère d'exploitation maximum des ressources du pâturage, par contre il faut le connaître pour réaliser une gestion optimale. Celle-ci est également liée aux facteurs suivants : distance par rapport aux points d'abreuvement, sensibilité du substrat à l'érosion, résistance des espèces de plantes pour l'exploitation au cours de la saison sèche et de la saison de pluies, système et objectif d'exploitation. Les ouvrages de Boudet & Leclercq (1970) et de Bille (19**) mentionnent des exemples de plans de gestion pour le Ranch, mais l'attention consacrée dans ces ouvrages à la qualité des pâturages est trop restreinte.

Sur la base de plans de gestion qui comprennent un calendrier d'utilisation pour les diverses unités, il est possible d'établir un profil de qualité de l'offre fourragère pendant le courant de l'année, lequel profil est déduit de celui des unités individuelles. Une illustration sommaire en est donnée dans III.3.1 pour le système de transhumance des bovins dans le village de Diafarabé (Traoré, 1978 ; Diallo, 1978). Les données qualitatives figurant au tableau III.14 concernent les pâturages du delta du Niger pour la période de décembre à juin, les pâturages de la Mauritanie pour les mois d'août et septembre, les pâturages comme ceux du Ranch pour juillet et octobre, périodes des grands déplacements, et les pâturages du bord du delta pour novembre. Alors que sur le Ranch une exploitation des pâturages pendant toute l'année sans supplémentation, ne permet pratiquement pas de gain de poids nette (Diarra, 1983), de tels pâturages jouent un rôle indispensable au cours de deux périodes de l'année, dans le cadre d'un système mobile qui peut entraîner un gain de poids nette de 50 kg de poids vif par animal (Breman *et al.*, 1978 ; III.3.1). Des mesures plus récentes effectuées sur les troupeaux du delta, font apparaître une image plus pessimiste (voir II.5.6), mais il est vrai que la disparition des graminées pérennes dans le delta a fortement diminué la possibilité de sélectionner un menu acceptable pendant la saison sèche.

Disponibilité

Pour préciser davantage la situation fourragère, il faut accorder de l'attention à la conversion de la production de la biomasse en disponibilité fourragère. Quatre facteurs doivent être pris en

considération : les pertes, l'accessibilité, les exigences de qualité en relation avec l'objectif de production, et les exigences de l'environnement (capacité de charge).

Pertes

Dans la région, deux chiffres basés essentiellement sur l'expérience, sont utilisés pour les pertes : 50 % de la biomasse est supposée disponible pour une exploitation pendant la seule saison des pluies, 35 % est supposée disponible dans le cas d'une exploitation pendant la saison sèche ou pendant une exploitation tout au long de l'année. Il s'agit là environ de l'ingestion réelle de nourriture pour une ingestion apparemment totale, basée sur la disparition de la strate herbacée.

Pour les espèces ligneuses, il existe trop peu de données concernant la région pour pouvoir utiliser un chiffre empirique. L'estimation a été basée sur les considérations suivantes : dans le cas d'une pâture *in situ* , les pertes par piétinement, termites et pourrissement seront pratiquement nulles. Il existe cependant une forte préférence de la part des bovins et des moutons pour la strate herbacée pendant la saison des pluies, et il existe une grande différence de qualité entre la feuille verte et la feuille sèche tombée à terre. C'est pourquoi seule la fraction de feuille qui est encore attachée à l'arbre ou à l'arbuste est considérée comme disponible. En moyenne, elle est estimée à 30 % de la production annuelle. Ce raisonnement ne vaut pas pour les chèvres et les dromadaires, et la chute des fruits ne peut être considérée de la même manière que la chute des feuilles, car la qualité des semences reste élevée.

La quantification des pertes est donc un sujet important de la recherche, d'autant plus que la limitation et la prévention des pertes constitue un objectif de gestion. La prévention des feux en est l'exemple le plus connu.

Les pertes ont déjà été traitées dans II.4.5.1 , lors de l'étude de la valeur f. Après les feux, ce sont les dégradations et le pourrissement qui sont les causes principales des pertes ; le rôle des termites est important à cet égard. La seule manière de prévenir ces pertes c'est de récolter et de conserver la récolte. Il faut vérifier si, compte tenu de la qualité des pâturages et le niveau de la production animale, la fauche ou l'ensilage peuvent être rentables.

La disponibilité en fourrage ligneux estimée à 30 % de la production annuelle, exige une analyse plus poussée. Dans le nord, sur des unités avec ruissellement et pour d'anciennes populations d'espèces ligneuses, il pourrait s'agir là d'une surestimation. Par contre dans le sud, pour des régions à concentration des écoulements et pour de jeunes populations, il pourrait s'agir d'une sous-estimation. Par ailleurs, il existe des espèces à feuilles persistantes telle que *Boscia senegalensis* sur F46a et F42, et d'autres dont la présence de feuilles se limite à la saison sèche (*Acacia albida*).

Accessibilité
L'accessibilité et la disponibilité sont deux concepts qui se chevauchent. *Acacia albida* n'est pas accessible pour le bétail des éleveurs pastoraux qui n'ont pas accès aux champs d'une certaine région. Il en va de même dans ce cas, pour les sous-produits de l'agriculture, et ceci est d'autant plus vrai lorsqu'un

tel système d'élevage produit trop peu de moyens pour permettre l'achat de sous-produits agro-industriels. Le stockage des sous-produits par l'un réduit à zéro l'accessibilité pour les autres. Les droits d'utilisation des pâturages jouent un rôle identique. Des ranches d'Etat, comme le Ranch de Niono, soustraient les pâturages aux systèmes locaux. Les contrôles effectués sur le territoire du village peut signifier l'exclusion de tiers. Dans tous ces cas, le contrôle individuel ou le contrôle de groupe permet d'éviter des pertes inutiles. Cependant il faut vérifier si ce gain contrebalance la nouvelle perte constituée par l'utilisation suboptimale des pâturages et des autres composants fourragers découlant d'une diminution de la complémentarité et de la mobilité.

Sous la notion de sélectivité, un autre aspect de l'accessibilité a déjà été traité, notamment celui des caractéristiques des plantes qui rendent négligeables la valeur nutritive pour une ou plusieurs espèces animales (épines, taux de tanin, etc.). L'accessibilité physique pourrait également être classifiée sous cette notion : l'accessibilité au pâturage aérien diminue en fonction de la hauteur des arbres et des arbustes, et ce dans l'ordre : moutons, chèvres, bovins et dromadaires, à moins d'une intervention du berger par la coupe. Lorsque l'évaluation des espèces ligneuses est effectuée comme il a été suggéré (II.3.3.3), l'accessibilité au pâturage aérien peut être calculée par espèce animale. Une étude de la pyramide des âges pour les populations d'espèces ligneuses importantes (figure II.9), donne une idée des variations éventuelles dans la calcul de l'accessibilité.

Objectifs de production

Lors de l'analyse de la sélectivité, il a déjà été question de l'influence qu'exerce l'occupation des pâturages sur la production animale, avant que la biomasse disponible par animal ne descende en-dessous du seuil de besoin en nourriture. Ce seuil peut être atteint par suite de possibilités insuffisantes de sélection et donc d'une qualité insuffisante du menu. II.5 et III.3 traitent de la manière d'estimer le niveau maximum de production animale, sur la base de la qualité moyenne et de la répartition de la qualité pour une charge de bétail donnée. Ces considérations peuvent également être utilisées en sens inverse en estimant pour un objectif de production souhaité (niveau donné de production de viande ou de lait, force de traction, fumier, etc.) quelle est l'occupation de pâturage possible pour une situation fourragère donnée. Il apparaît ainsi que, sans la disponibilité des concentrés, une grande partie de la biomasse ne pourra être utilisée à cause de sa trop faible qualité. Ceci vaut notamment dans le sud du Sahel et dans la savane, et plus encore pour l'élevage sédentaire que pour l'élevage transhumant. La figure II.20 est confirmée dans III.4.3 par l'argumentation selon laquelle, pour une production de lait ou de viande d'une certaine importance, le menu doit avoir pendant la saison sèche un taux moyen d'azote d'au moins 8 g/kg. En utilisant cette figure ainsi que les données du tableau II.27 il est possible de faire une estimation quant à la fraction de la biomasse pouvant être utilisée, par exemple, pour les bovins sédentaires. Pour ce faire, le Ranch est considéré dans son ensemble, c'est-à-dire comme la somme des unités du tableau, avec les moyennes pondérées des valeurs de production et de qualité de ces unités. Cet exemple est traité dans sa forme la plus simple, c'est-à-dire qu'il n'a pas été tenu compte de données spécifiques concernant l'évolution de la qualité, l'appétibilité, les pertes et l'accessibilité.

La production de matière sèche de la strate herbacée pendant une année moyenne est de 2600 kg/ha avec un taux d'azote de 5,9 g/kg. Dans le cas d'une exploitation tout au long de l'année, 35 % au maximum

sont disponibles, soit 910 kg/ha. La qualité ne constitue pas un obstacle pendant la saison de pluies de 3 mois, donc 3/12 × 910 = 227 kg/ha peuvent être ingérés dans leur totalité. Un taux d'azote de 5,9 g/kg, à la fin de la période des pluies, diminuant vers 2/3 de cette valeur à la fin de la saison sèche (équation II.8), signifie en moyenne dans la saison sèche un taux de (5,9 + 2/3 × 5,9)/2 = 4,9 g/kg. La fraction comportant un taux d'azote de 8 g/kg ou plus, nécessaire pour atteindre le niveau de production animale souhaité, est selon la figure II.20 de 0,38 (voir III.4.3 pour la théorie). Pendant la saison sèche (9 mois) la disponibilité est au maximum 9/12 × 0,38 × 910 = 259 kg/ha, lorsque seule la strate herbacée est considérée. Le total est donc 227 + 259 = 486 kg/ha.

Cependant 1500 kg/ha de fourrage des espèces ligneuses sont également produits. Selon les estimations, 30 % en sont disponibles pendant la saison sèche, période pendant laquelle le fourrage ligneux fait également partie du menu des bovins. Les espèces plus ou moins appétées par les bovins (voir IV) constituent 60 % de la production ; au maximum sont donc disponibles pendant la saison sèche : 1500 × 0,30 × 0,60 = 270 kg/ha. De ce montant, seulement 30 % sont accessibles dans la zone de transition entre le Sahel et la savane, c'est-à-dire 80 kg/ha. Deux tiers de cette quantité proviennent des légumineuses. Le taux moyen d'azote pendant la saison sèche est alors de 14,5 g/kg (II.2.2.3).

En principe, la quantité totale de fourrage disponible pendant la saison des pluies, est donc une biomasse de la strate herbacée de 227 kg/ha, pour laquelle la qualité ne constitue pas un obstacle à l'ingestion. Viennent s'y ajouter pour la saison sèche 9/12 × 910 = 682 kg/ha avec un taux d'azote de 4,9 g/kg, plus 80 kg/ha de fourrage ligneux avec un taux d'azote de 14,5 g/kg. Sont donc disponibles pendant la saison sèche, 762 kg/ha avec un taux d'azote moyen de 5,9 g/kg. Il ressort de la figure II.20 qu'une fraction de 0,58 de cette quantité présente un taux d'azote de 8 g/kg, soit 762 × 0,58 = 442 kg/ha. Pendant la période sèche et la période des pluies, il y a donc 670 kg/ha (227 + 442 = 669) de fourrage utilisable provenant de la strate herbacée et des espèces ligneuses (voir II.5.6 pour ce qui concerne cette utilisation en principe non conforme de la figure II.20). En d'autres termes, sur la production moyenne annuelle de 4100 kg/ha, seuls 15 % restent disponibles pour les bovins, dans le cas d'une exploitation sédentaire tout au long de l'année, soit 23 % de la strate herbacée et 5 % du pâturage aérien. Il se peut même qu'il y ait surestimation pour ce qui concerne la contribution du pâturage aérien, si tant est que le taux de tanin limite l'utilisation des protéines (III.4.2.2).

Capacité de charge

La capacité de charge est le dernier paramètre qui a son importance pour l'estimation de la production animale. Cette caractéristique complexe des pâturages, traitée plus en détail dans II.5 et III.3, est d'une part une dérivée des paramètres précédents (production, pertes, accessibilité et disponibilité de la biomasse), pouvant être résumés en la quantité annuelle de fourrage disponible et sa qualité pour un objectif de production donné. D'autre part, il faut tenir compte de la part de fourrage disponible qui peut être exploitée annuellement, sans à terme influencer négativement la production qualitative et quantitative des pâturages. Lorsque l'évaluation s'étend sur plusieurs années, il est possible de vérifier à l'aide d'expériences les conclusions principales de III.4.4 relatives à l'intensité et à la période d'exploitation.

Ces conclusions sont les suivantes pour le Ranch, s'il s'agit d'y assurer une exploitation durable :
- l'exploitation doit préserver une biomasse résiduelle protectrice du sol qui
  - est nulle pour F33a, F42 et F46a, à condition que pendant la période de germination et d'installation, l'occupation des pâturages ne soit pas supérieure à 0,2 UBT/ha ;
  - doit être de quelques centaines de kg/ha pour F20 ;
  - qui va croissant de F31 --> F33 -->F41, et qui dans ce dernier cas devrait peut être bien être de 200 kg/ha ;
- la charge moyenne d'exploitation sur les graminées pérennes pendant l'exploitation au cours de la période de pluies ne doit pas être supérieure à la charge maximum possible dans le cas d'une dominance des espèces annuelles sur la même unité (III.4.4.3) ;
- l'utilisation du pâturage aérien ne peut dépasser 15 % de la production annuelle.

La vérification de ces conclusions peut s'effectuer de deux manières, ou bien par essais sur les terrains expérimentaux (dans le cas de doute sur la capacité de charge estimée, basée entre autres sur ces conclusions), ou bien en établissant sur la base de ces estimations, un plan d'utilisation pour une zone comme le Ranch, et en suivant le bétail et les pâturages d'année en année. En ce qui concerne le bétail, il faut se demander si, pour la charge de bétail donnée, le niveau de production souhaité est atteint. Pour les pâturages des différentes unités de paysage, il faut contrôler si I ne diminue pas (à cause d'un ruissellement accru, à déduire indirectement d'un sol de plus en plus dénudé), ou mieux encore, si N_s reste à son niveau (II.3.6.5 , question 9b) et si les populations de graminées pérennes et d'espèces ligneuses ne diminuent pas (figure II.9).

Cette dernière activité ne peut pratiquement plus être considérée comme une recherche d'appui de l'exploitation des pâturages ; c'est la tâche de l'exploitant lui-même. Cependant, dans des situations où les droits d'utilisation des pâturages ne sont pas ou à peine réglementés, le suivi par les autorités constitue un outil permettant de dépister les conséquences d'une utilisation incontrôlée. La technologie des satellites offre de plus en plus de possibilités pour recueillir des impressions globales. Mais pour une analyse détaillée, on en est réduit aux évaluations décrites dans II.3. Un manuel, établi sur la base de ces évaluations, permet de suivre rapidement et relativement à peu de frais l'évolution des pâturages dans le temps (Breman & Diarra, 1991).

II.4.5.3. Gestion et aménagement

Facteurs limitatifs

Pour une bonne gestion ainsi que pour la formulation de propositions relatives à l'amélioration des pâturages, il est crucial de connaître les facteurs limitatifs de la production végétale et animale. En fait, les aspects qui entrent en ligne de compte pour cette analyse plus détaillée ont déjà plus ou moins été analysés :
- N limite la production végétale, mais dans le cas d'une certaine amélioration, par exemple sur F33 par stimulation de *Zornia glochidiata* par le biais de l'exploitation, ce sera P qui deviendra limitatif.
- Une comparaison des tableaux II.27 et II.30 montre que, déjà au début de la saison sèche, le taux

moyen d'azote de la strate herbacée sur toutes les unités du Ranch est trop faible pour assurer une ration couvrant les besoins d'entretien de l'animal. Il en va vraisemblablement de même pour le phosphore : Cissé (1986) a trouvé un taux moyen de phosphore de 0,8 g/kg ou moins sur F33 et F42 et de 0,9 g/kg sur F41, alors que 1,2 g/kg sont exigés (tableau II.30).
- La sensibilité à l'encroûtement de F41 et F44, et dans une moindre mesure celle de F33, est telle que toute réduction de la biomasse protectrice du sol, donc toute exploitation, entraîne le risque d'un ruissellement accru et donc d'une érosion en nappes. La disparition d'*Andropogon gayanus* sur F41 par suite de la sécheresse a rendu pratiquement impossible une exploitation à long terme. L'exploitation et simultanément le maintien d'une biomasse restante suffisante ne sont possibles que lors de la dominance d'une telle graminée pérenne.
- Bien que l'appétibilité soit une notion relative, l'existence de différences d'appétibilité entre les diverses espèces impose des exigences importantes à la gestion du troupeau laquelle doit veiller à une utilisation optimale des pâturages que ce soit par pacage ou par enclos. A la fin des années 60 par exemple, la biomasse de la strate herbacée de F42 se composait pour 65-80 % d'espèces considérées comme non appétées ; sur F33, il s'agissait de 50 % ; sur F41, de 40 %, sur F31 et F20 de 35 %, et sur F46a, c'était négligeable (Boudet & Leclercq, 1970).
- Le taux de tanin et la digestibilité donnent pour les bovins et les moutons un caractère beaucoup plus absolu à la notion d'appétibilité du fourrage ligneux. Une grande partie de la production de fourrage du Ranch devient ainsi indisponible pour ces espèces d'animaux.

Gestion des pâturages

La gestion des pâturages devra viser à un profit maximum des pâturages à longue échéance, malgré les restrictions citées ci-dessus. La prise en compte de la capacité de charge représente un aspect de cette question, mais la période d'exploitation en constitue un autre. En ce qui concerne ce dernier point, des suggestions ont été faites par ailleurs pour le Ranch (Boudet & Leclercq, 1970 ; Bille, 19**). Une des suggestions concerne l'exploitation des unités dominées par *Andropogon gayanus* : lors d'une double occupation des pâturages en juillet, octobre et novembre, le profit tiré de cette graminée pérenne serait double. Cette suggestion doit certainement être plus amplement vérifiée. Cissé et Breman (1980) ont démontré la sensibilité de cette espèce face à une intensité de pâture pendant la saison des pluies, intensité de pâture qui entraîne un épuisement de la propre réserve d'éléments nutritifs. Cependant, on peut s'attendre à ce que cette sensibilité diminue au fur et à mesure que l'on s'approche du centre de la région de dissémination de cette espèce. Si, malgré tout, on veut maintenir l'exploitation intensive pendant la saison des pluies, il faudra prévoir des années de protection dans le plan de gestion. Dans la zone sahélienne, il est vraisemblablement plus utile de profiter de la présence des espèces pérennes en ayant recours à une exploitation limitée :
- une faible intensité de pâture permet le maintien d'une biomasse élevée et permanente protégeant le sol ;
- en planifiant cette exploitation pendant la saison sèche, la production animale de la saison des pluies est sauvegardée. La recherche visant à vérifier cette hypothèse devrait s'orienter également vers le rapport entre la production principale et les repousses (figure III.35).

Compte tenu de la charge actuelle de bétail dans de grandes parties des pays sahéliens, il est peu

probable que la protection des pâturages sur de longues périodes puisse être utilisée comme outil de gestion pour promouvoir la régénération de populations de graminées pérennes et d'espèces ligneuses en forte régression. La régénération active est donc souhaitable ; pour chaque zone agro-écologique, il faudra poursuivre les recherches afin de développer la méthode la plus efficace. Au Ranch, la priorité devrait être accordée à la régénération de la population d' *Andropogon gayanus* sur F41. Compte tenu des déficits de phosphore signalés dans le cas d'un faible développement des racines (II.4.5.1), il est souhaitable d'étudier l'effet des engrais phosphatés sur la régénération. L'apport de phosphore pourrait éventuellement raccourcir les durées de protection nécessaire. La méthode suggérée par Deneve & Beck (1982) pour permettre une régénération vaut la peine d'être essayée. Cette méthode consiste à installer de manière disséminée de nombreuses petites parcelles ensemencées et protégées.

Parallèlement aux situations où la régénération des peuplements d'espèces ligneuses entraîne une amélioration des pâturages (ou est susceptible de le faire), il existe des situations dans lesquelles la coupe permet d'obtenir une production plus élevée de la strate herbacée, ce qui permet davantage de possibilités pour la production animale. Il s'agit là cependant d'une mesure de gestion qui, au Sahel, rapportera rarement un profit de nature à contrebalancer les risques d'un affaiblissement de la stabilité de l'environnement. Mais la suggestion de Boudet & Leclercq (1970) de procéder à un éclaircissement des peuplements denses d'*Acacia seyal*, dans les dépressions des régions sablonneuses sur le Ranch, semble très acceptable. Ils considèrent qu'un taux de recouvrement de 30 % constitue la limite inférieure d'une telle intervention. Lorsque décision est prise de procéder à cette mesure, il est souhaitable de profiter de l'occasion de tester la théorie relative à la concurrence entre la strate herbacée et les espèces ligneuses (III.2.6).

Amélioration des pâturages

La conclusion selon laquelle le manque d'éléments nutritifs limite la production végétale et animale, porte en soi l'idée d'un examen de l'utilisation d'engrais pour l'amélioration des pâturages. Comme le mouvement perpétuel « fumier --> production végétale --> production animale --> fumier » ne s'applique pas non plus dans les pays sahéliens, l'idée des engrais chimiques s'impose. L'étude se trouve à la base de ce manuel et le rôle central joué par les expériences d'application d'engrais (II.4.5.1) ont mené à une méthode permettant d'estimer le rapport input/output d'une option technique telle que l'utilisation des engrais chimiques (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 412-414 ; Breman & Traoré, 1986a ; 1986b ; 1987 ; van Wijngaarden, 1988). La méthode est assez imprécise, donc une vérification expérimentale s'impose, lorsque l'analyse des coûts et profits basée sur le rapport estimé d'input/output n'est pas vraiment négative.

Dans leur ouvrage, Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 425-434) arrivent à la conclusion que l'utilisation d'engrais chimiques ne se justifie pas pour l'élevage extensif au Sahel, compte tenu des prix en cours au début des années 80, aussi bien pour les engrais que pour le bétail et la production animale. Breman et Traoré (1986a, 1986b, 1987) arrivent cinq ans plus tard à une conclusion analogue : l'élevage ne peut profiter qu'indirectement des engrais chimiques, et ce par l'intensification de l'agriculture. Ces conclusions, liées au site, au temps et au système de production, doivent cependant être vérifiées pour

les diverses situations.

Les légumineuses sont considérées comme une alternative « naturelle » à l'engrais chimique. Dans les pâturages, ces légumineuses peuvent être introduites ou stimulées. Dans l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 434-440), cette option n'a pas été considérée comme économiquement rentable pour les pâturages de la zone sahélienne, compte tenu des rapports de prix au début des années 80. Les frais élevés sont surtout occasionnés par la pauvreté du sol en phosphore qui entraîne la nécessité d'engrais phosphatés, et par le caractère annuel des pâturages, ce qui exige un réensemencement fréquent.

Ce dernier aspect fait que les conclusions ne sont pas automatiquement valables pour la savane et pour des régions à concentration suffisante des écoulements dans le sud du Sahel. Breman et Traoré (1987) ont dû se prononcer au sujet de cette option sur la base d'expériences effectuées ailleurs. En effet, on ne dispose pas de données relatives à ces régions, dans lesquelles il y a eu introduction de légumineuses dans les pâturages avec observation dans le temps de cette introduction, observation du besoin en phosphore et observations des effets sur la production animale. Comme indiqué dans I.1, l'extrême nord de l'Australie est le plus approchant du climat et du sol de la savane d'Afrique occidentale. Cette ressemblance ressort également des valeurs constatées pour la capacité de charge des pâturages et la production animale (tableau II.29, repris de l'ouvrage de Breman & Traoré, 1987). Les recherches devront démontrer si les légumineuses, avec ou sans engrais phosphatés, ont un effet similaire en Afrique occidentale. Bien que du point de vue coûts et profits, l'introduction sans application de phosphate semble la plus intéressante, il faut se rendre compte que ceci entraîne en Australie de grands problèmes de gestion à cause du manque de stabilité de l'introduction. Le manque de P dans le fourrage forme encore un problème plus important.

Tableau II.29
Influence de l'amélioration des pâturages par ensemencement des légumineuses. Avec et sans engrais phosphatés. Influence sur le potentiel et la production animale dans le grand nord de l'Australie [1)].

	capacité de charge (ha/UBT)	production animale en poids vif	
		(kg/UBT)	(kg/ha)
pâturages naturels	15-20	30	1-2
+ légumineuses	3-5	30	5-10
+ légumineuses + P [2)]	1-2	60	35-40

[1)] compilation de diverses publications ;
[2)] 50 à 200 kg de superphosphate durant la première année, 25 à 100 kg les années suivantes.

Il ressort de ce qui précède que la suggestion de Boudet & Leclercq (1970) de corriger le manque d'azote des pâturages du Ranch pendant la saison sèche, par introduction de *Centrosema pubescens* et *Doliches*

lablab sur F46a est logique du point de vue du choix de l'unité : c'est, en effet, l'unité ayant la plus grande concentration des s (tableau II.24) et le phosphore pourrait bien y être l'élément le moins limitatif compte tenu de la tendance F33 —> F41 —> f42 (II.4.5.1). Des recherches plus approfondies sont cependant nécessaires, car il est apparu qu'il s'agissait là de l'unité qui présentait dans la strate herbacée le plus faible taux de légumineuses naturelles. C'est également l'unité ayant le plus grand taux de légumineuses parmi les espèces ligneuses. Il est possible que la concurrence pour le phosphore en soit une cause, compte tenu de l'enracinement vraisemblablement superficiel des espèces ligneuses sur ce vertisol. Afin d'influencer de manière positive la concurrence de la strate herbacée, la légumineuse à introduire devra au moins être pérenne. Mais peut être faudrait-il simultanément diminuer le taux de recouvrement par les espèces ligneuses. Il ne semble cependant pas raisonnable de remplacer une production assurée de fourrage de *Pterocarpus lucens* par une amélioration incertaine de la strate herbacée. Il faudrait au moins une recherche expérimentale qui comparerait cette amélioration avec une amélioration des peuplements d'espèces ligneuses du Ranch par éclaircissement et/ou plantation, avec ou sans engrais phosphaté dans le trou de plantation.

Bien que le manque d'informations oblige à faire de telles expériences, il est plus rationnel de rentabiliser l'utilisation du phosphore sur les légumineuse par la culture fourragère, et de profiter ainsi de sa capacité de fixation d'azote. Même pour cette approche, les problèmes de gestion seront suffisamment importants. La conservation aura alors une plus grande chance de réussite, car des pertes précieuses pourront être évitées, la production par unité de superficie sera plus élevée et l'utilisation des fourrages (moments cruciaux : catégories spécifiques d'animaux) pourra mieux être maîtrisée. L'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 426, 434) mentionne que, même dans le sud du Sahel, la culture des légumineuses avec des engrais phosphatés représente une option relativement intéressante.

Lorsque l'utilisation des pâturages est combinée avec un supplément ayant par rapport au pâturage une qualité élevée, la pression d'exploitation sur les pâturages augmentera. Ceci se vérifie déjà pour une occupation des pâturages inchangée, à cause d'une plus grande ingestion de nourriture. Lorsque simultanément le fumier est utilisé de manière accrue pour l'agriculture, il y a risque que les pâturages se dégradent plus vite qu'auparavant. L'importance de la gestion des pâturages augmente encore, lorsque les pâturages perdent leur protection relative, formée par la mauvaise qualité du matériel produit. Une réglementation pour l'utilisation des pâturages et des droits fonciers adaptés sont alors encore plus indispensables. La recherche se doit d'épouser au maximum cette évolution.

Le suivi des pâturages et les critères indiqués à la fin de II.4.5.2, permettent de vérifier si la gestion, formulée sur la base de ce qui figure ci-dessus, est satisfaisante.

II.5.Evaluation des pâturages et production animale

II.5.1. Introduction

Dans les chapitres II.2 à II.4, l'accent a été mis sur l'appréciation de la production primaire des pâturages dans les pays sahéliens. Une attention toute particulière a été accordée à la quantité de matière végétale

produite par unité dans une zone climatique donnée, ainsi qu'au taux d'azote de cette matière. Par ailleurs, il importait de découvrir les facteurs qui influencent la production dans des circonstances déterminées ; le rapport entre la production végétale et la disponibilité en fourrage a également été traité. Ce dernier point sera traité plus en détails, avant de passer aux conséquences pour la production animale : ingestion de nourriture par le bétail, croissance, production laitière et reproduction, productivité du troupeau et capacité de charge des pâturages. L'ordre dans lequel sont traités ces aspects est globalement identique à celui de III.3 , chapitre auquel il sera régulièrement fait référence pour de plus amples détails et des informations de fond. Les questions traitées dans II.4.5 seront approfondies, à savoir :
- quelles sont les caractéristiques importantes des pâturages qui déterminent la production animale et la productivité ;
- comment déterminer ces caractéristiques.

On s'interroge ensuite sur la méthode pour se prononcer sur le niveau de la production et de la productivité animale, sur la base de ces caractéristiques.

Trois méthodes permettent de se former une idée sur la contribution éventuelle des divers types de pâturages à la couverture des besoins en fourrage pour le bétail et de se former ainsi une opinion sur la production animale qui en résulte :
- connaissance de la quantité et de la qualité des fourrages disponibles d'une part, et connaissance des processus qui déterminent l'ingestion de nourriture et la production de bétail, d'autre part ;
- mesures directes des populations animales et de la production animale dans une situation spécifique ;
- application de rapports statistiques constatés ailleurs, entre d'une part le nombre d'animaux et la production animale, et d'autre part, les caractéristiques des pâturages.

Chacune de ces trois méthodes présente des avantage et des inconvénients ; il serait donc injustifié de présenter l'une d'entre elles comme la meilleure. Ce manuel accorde beaucoup d'attention à la première méthode. Celle-ci présuppose des connaissances suffisantes quant aux processus fondamentaux qui déterminent l'ingestion des fourrages, la croissance et la production des bovins, permettant ainsi un jugement quantitatif du niveau de production pour une disponibilité et une qualité données de fourrages. Tous les processus ne sont cependant pas connus de façon équivalente et leur quantification exacte présente plus ou moins de difficultés. Ceci revient à dire que les appréciations ne sont pas toujours fiables.

Un autre argument en faveur de l'importance accordée à cette méthode, est le besoin en estimations de la capacité de charge et de la production animale pour des surfaces étendues, dans des situations où il est pratiquement impossible de redéterminer ces paramètres pour chaque type de pâturage. Les moyens pour ce faire font défaut, et l'utilité économique directe d'une telle recherche expérimentale rend peu probable une mise à disposition de ces moyens dans un proche avenir.

La méthode des mesures directes (deuxième méthode) ne peut être appliquée que de façon limitée, et ce plus particulièrement dans les régions du sud, où l'élevage est principalement sédentaire. Cet élevage

revêt une importance de plus en plus grande pour soutenir l'agriculture et s'étend sur des surfaces qui s'amenuisent rapidement. Mais, comme on l'a déjà mentionné dans II.4.5.2, les expériences sont indispensables : les résultats des calculs théoriques obtenus sur la base de la première méthode doivent être vérifiés, et par ailleurs, des expériences sont nécessaires pour obtenir des estimations fiables de la capacité de charge. Il faut également vérifier si les données concernant les bovins, à la base de ce chapitre et de III.3, peuvent être utilisées telles quelles pour les autres espèces animales, lorsque (ce qui est souvent le cas) le total du cheptel mixte est exprimé en UBT. Il est bon de souligner que le plaidoyer de Boudet (1978) en faveur de telles expériences reste d'actualité : bien que les connaissances des processus qui déterminent la production végétale aient fortement augmenté depuis, celles qui concernent l'interaction entre l'animal et le pâturage ont moins progressé. Ce manuel expose des considérations détaillées sur les problèmes de la capacité de charge ; cependant les directives concernant l'exploitation de pâturages spécifiques sont moins concrètes qu'il ne serait souhaitable. Le suivi des pâturages reste donc une nécessité lors de l'application de ces directives.

Pour terminer, il est possible d'extrapoler les résultats expérimentaux à l'aide de rapports statistiques (troisième méthode). Ceci présente l'avantage de pouvoir généraliser les résultats recueillis sur un ou plusieurs sites. Cette méthode comporte évidemment un risque : les rapports établis peuvent ne présenter qu'une validité ponctuelle, et une simple extrapolation entraîne alors des conclusions erronées. La figure I.20 en donne un exemple : une extrapolation de données en provenance d'Australie concernant le rapport entre le gain de poids annuelle du bétail et la durée de la saison de croissance, donne des chiffres relativement fiables pour la zone soudanaise et le sud du Sahel ; mais il y a forte sous-estimation par rapport au gain de poids dans le nord du Sahel. Le tableau II.29 représente un autre exemple de l'utilisation de la troisième méthode.

Il serait inexact de dire que le choix en faveur d'une méthode soit basé exclusivement sur les avantages et les inconvénients du point de vue scientifique. Le point de départ doit être constitué par une bonne formulation de la problématique. C'est à partir de cette formulation qu'il est possible de déterminer la précision exigée pour les réponses. Et finalement beaucoup dépend des moyens et du temps disponibles pour apporter les réponses.

Une attention toute particulière doit être accordée à la précision. On a souligné à plusieurs reprises, la forte variabilité d'une année sur l'autre de la production végétale dans les pâturages semi-arides. Cette variabilité augmente à mesure que diminue la pluviosité annuelle et marque ainsi de plus en plus toute l'activité biologique. Ce phénomène rend trompeur l'utilisation de chiffres moyens pour la production végétale et la capacité de charge. Les indications de variations autour de la moyenne importent plus que l'évaluation précise de cette moyenne sur plusieurs années. C'est pourquoi lors de l'estimation de la production végétale, on utilise la différence entre les années sèches et les années moyennes.

La production par animal diverge fortement d'une année sur l'autre à cause des variations de l'offre fourragère. En outre, dans les systèmes extensifs, l'estimation de la production par animal sur la base de la qualité du fourrage et de son ingestion ne peut jamais être très exacte, et ce, à cause du rapport défavorable entre l'ingestion d'énergie et le besoin en énergie pour l'entretien (voir I.3.6). Pour un faible

niveau de production, la différence entre les deux est minime par rapport à leur valeur absolue, et elle est pour cela sujette à une grande erreur d'estimation. Concrètement, ceci signifie que même lorsque l'offre fourragère est bien connue, il est impossible de prévoir si le gain de poids annuelle d'un bovin sera de 25 ou 50 kg, une différence qui dans la pratique peut être décisive pour la rentabilité (ou la survie ?).

Lors d'une estimation de la production par animal sur la base de l'offre fourragère, il est donc plus réaliste de tendre vers une délimitation des limites qui enserrent cette production, plutôt que de rechercher une réponse simple. Cela oblige également à concentrer l'attention sur les goulets d'étranglement de la production. En effet, la détermination du principal facteur limitatif de la production est tout aussi important que l'estimation de la production des animaux dans des conditions données. Ce principal facteur limitatif peut être : l'offre fourragère par animal, ou la qualité du fourrage, et dans ce dernier cas il faut savoir s'il s'agit d'un manque de phosphore, d'azote ou d'énergie (II.4.5.1). Utilisé de cette façon, l'évaluation des pâturages passe depuis la simple constatation du potentiel de production des pâturages, à l'analyse des causes de différences dans ce potentiel et à l'indication de moyens pour maintenir ou agrandir ce potentiel.

II.5.2. Disponibilité et qualité fourragère

La disponibilité en fourrage, en tant que dérivée de la production végétale a été traitée en détail dans II.4.5.2. Dans l'estimation de la disponibilité en fourrage, l'évaluation de l'importance des pertes est cruciale, bien que dans ce manuel, les chiffres utilisés sont souvent des chiffres moyens basés sur les résultats de mesures à différents endroits. La plupart du temps, ces chiffres concernent un total annuel, précisé ou non par composant. Les pertes n'interviennent cependant pas nécessairement à la même période pour les divers composants situés à différents endroits. C'est pourquoi le moment de détermination de la disponibilité en fourrage est d'importance capitale. Ce moment dépend également de l'objectif pour lequel ces chiffres sont destinés. Si l'objectif est d'obtenir une impression générale du rapport entre la disponibilité en fourrage et le besoin en fourrage dans la période la plus critique, le choix en faveur du début de la saison sèche est évident. Ce fut le cas, entre autres, pour les considérations globales relatives à la capacité de charge dans I.3.4. Ceci peut suffire également dans le cas d'études plus détaillées, du moins lorsqu'il est question de l'utilisation des mêmes pâturages pendant toute l'année pour une intensité donnée. Cette situation est cependant plutôt exceptionnelle. De nombreux systèmes d'élevage utilisent à plusieurs moments de l'année des régions différentes, éventuellement complétées par des sous-produits de l'agriculture. Dans ce cas, il peut être nécessaire d'analyser la situation fourragère par saison ou même par mois. Lorsque cette décision est prise, on remplace le point de départ « étendue du pâturage » par « système d'élevage donné ».

Parallèlement à la disponibilité en fourrage, il faut également en règle générale inventorier la population animale qui en dépend. Mais, les méthodes utilisées dans ce but ne font pas partie du cadre de ce manuel. Les facteurs de conversion utilisés pour transposer les différentes catégories d'animaux en unités bovines tropicales sont par contre fournies : 1 UBT = 1,5 bovin = 10 moutons = 12 chèvres = 2 ânes = 1 cheval = 0,8 chameau (Le Houérou & Hoste, 1977).

La qualité du fourrage dépend de sa composition. Quant aux fourrages constitués de plusieurs composants, le taux et la composition de chacun de ces composants et la mesure dans laquelle les animaux peuvent sélectionner, contribuent à déterminer la qualité. Ces deux aspects ont été traités dans II.4.5.2, mais II.5.3 en traitera plus en détails. D'autres aspects de qualité, telle la digestibilité du fourrage, ont été traités dans II.4.5.

Il n'est pas nécessaire de connaître pour tous les cas, la totalité des paramètres de qualité pour pouvoir faire des estimations relatives à la production animale. Le taux d'azote à lui seul constitue déjà dans de nombreux cas un bon critère pour indiquer les limites de la productivité escomptée sur la base d'un fourrage ou d'un régime donné.

Dans les systèmes extensifs, la première question qui se pose et la plus importante est de savoir si un fourrage donné permet la croissance des animaux ou bien s'il entraîne une perte de poids. Ensuite, il s'agit de savoir à quel gain ou perte de poids il faut s'attendre pour une catégorie d'animaux déterminée. La réponse à cette dernière question est de loin plus difficile. Le cas des bovins est traité dans II.5.3 et II.5.4.

Pour amorcer la réponse à la première question, le tableau II.30 fournit un nombre de valeurs indicatives minimum auxquelles doivent se conformer la digestibilité, le taux d'azote, le taux de phosphore, le taux de calcium, le taux de magnésium et le taux de sodium, pour constituer un « fourrage d'entretien ». Les taux pour les minéraux sont basés sur des données d'Underwood (1981) et sont valables globalement pour les bovins, les moutons et les chèvres. Pour des informations plus détaillées et des données générales sur les minéraux pour lesquels des traces suffisent, prière de se référer au même auteur. Des données concernant la disponibilité de tels micro-éléments dans les pâturages des pays sahéliens peuvent être trouvées dans des atlas d'élevage de l'IEMVT/CTA (IEMVT, [1987]a, b et c). Les données concernant la digestibilité et le taux d'azote sont développées dans III.3.2.

Tableau II.30
Valeurs minimales exigées pour la ration d'entretien des ruminants en matière de digestibilité et de taux d'éléments nutritifs.

digestibilité de la matière sèche (%)		48
taux d'éléments nutritifs (g/kg de matière sèche) :	N	8
	P	1,2
	Ca	2
	Mg	0,7
	Na	0,6
	K	6

L'utilisation des données du tableau II.30 doit se faire comme suit. Tout d'abord il s'agit de constater le taux d'azote et la digestibilité d'un fourrage. Si ces deux valeurs sont supérieures aux valeurs minimum indiquées, on peut s'attendre à un bilan énergétique positif et donc à une croissance, à condition que les autres conditions minimum soient remplies. Si le taux d'un ou de plusieurs éléments est identique ou inférieur aux valeurs minimum indiquées, il faut tenir compte de ce déficit et par conséquent d'une production moindre.

Si le taux d'azote et/ou la digestibilité sont inférieurs aux valeurs du tableau II.30, l'ingestion d'énergie restera en-deçà du niveau d'entretien et l'animal perdra du poids. Dans cette situation, il n'est plus possible d'indiquer les besoins en macro- et micro-éléments ; la décomposition des tissus libère des éléments qui peuvent être partiellement réutilisés. Donc les taux d'éléments dans le fourrage n'offrent plus de prise par rapport à la présence ou l'absence de symptômes de carence. L'ajout de ces minéraux à un tel fourrage ne permettra en aucun cas de sauvegarder le poids du bétail : pour ce faire, il faudrait également modifier le taux d'azote et la digestibilité.

Ce qui précède signifie concrètement que les prévisions des besoins en minéraux sont possibles pour une situation où les animaux peuvent grandir (la plupart du temps pendant la saison des pluies et parfois pendant une partie de la saison sèche), mais non pour une situation avec perte de poids par suite de la faible digestibilité et/ou du faible taux d'azote des fourrages.

Face aux déficits de phosphore, il faut s'attendre à une différence manifeste entre, d'une part le nord du Sahel, et d'autre part le sud du Sahel et la zone soudanaise. Dans le nord du Sahel les taux de phosphore dans les graminées se situent, même pendant la saison sèche, au-dessus de 1,5 g/kg ; dans les zones plus méridionales, ceci n'est pas le cas pour la plupart des types de pâturage (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 321). Les taux de phosphore dans les graminées y descendent en-deçà du niveau exigé pour l'entretien, et ce, déjà pendant la saison de croissance. C'est ainsi qu'à Niono dans les premières semaines de la saison de croissance seulement, les taux mesurés se situaient entre 1 et 1,5 g/kg, ensuite ces taux se situaient en moyenne en-dessous de 1 g/kg (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 201).

Une question pratique importante en rapport avec les faibles taux d'azote, est de savoir dans quelle mesure l'apport d'azote non protéique (généralement l'urée) peut pallier de tels déficits. Ceci dépend de la digestibilité (voir III.3.2). La figure II.21 indique des données limites pour la valeur d'azote, en-dessous desquelles l'apport d'urée est efficace. Il ressort de la figure que pour une digestibilité de 48 % et un taux d'azote de 6 g/kg, l'azote est limitatif pour l'ingestion de nourriture ; l'apport d'urée pourrait relever l'ingestion jusqu'au niveau d'entretien. Il n'est pas possible d'aller beaucoup plus loin, car la digestibilité est trop basse. Une amélioration supplémentaire ne peut être réalisée qu'en administrant parallèlement à ce fourrage d'autres produits à digestibilité plus élevée et avec un taux d'azote correspondant.

Figure II.21
Valeurs limites pour le taux d'azote dans le fourrage grossier, en-dessous desquelles l'ajout d'urée

augmente l'ingestion. Ces valeurs sont présentées en tant que fonction de la digestibilité de la matière sèche.

L'utilité de l'apport d'urée peut par ailleurs être jugée à l'aide des taux d'ammoniaque dans la liqueur du rumen de la panse d'animaux qui se nourrissent exclusivement du fourrage en question. Si ce taux est inférieur à 50 mg d'azote par litre, l'apport d'urée est en règle générale efficace, mais rarement au-delà.

Lorsque l'on compare les valeurs critiques pour le taux d'azote de la figure II.21 avec le rapport moyen entre le taux d'azote et la digestibilité des fourrages grossiers en provenance des pays sahéliens (tableau III.13), il apparaît qu'en moyenne l'azote n'est pas en premier lieu limitatif pour l'ingestion du fourrage ; c'est-à-dire que, sur la base des valeurs moyennes, l'apport d'urée semble peu efficace. Il existe certes des exceptions. Un exemple remarquable est constitué par la matière d' *Echinochloa spp*., dont le « bourgou ». On peut y constater des taux d'azote de 5 g/kg pour une digestibilité de 70 % (figure III.20), donc loin en-dessous de la valeur critique. Cela signifie que lorsque seul ce fourrage est disponible, l'ingestion est très faible. Cette ingestion augmenterait selon toute vraisemblance dans le cas d'ajout d'urée ou d'autres sources d'azote. Dans la pratique, il apparaît que les éleveurs laissent brouter leur bétail en alternance sur le « bourgou » et sur la repousse de, par exemple, *Vetiveria nigritana*. Cette dernière graminée possède justement un taux d'azote relativement élevé pour une digestibilité donnée, ce qui compense entièrement ou en partie le manque d'azote du « bourgou ».

II.5.3. Sélectivité et ingestion du fourrage

Le fourrage dont le bétail dispose à un moment déterminé, se compose rarement d'une matière homogène. Ceci vaut aussi bien pour les animaux dans les pâturages qui ont le choix entre diverses espèces de plantes ou parties de plantes, que pour les animaux nourris à l'étable avec du foin ou des résidus végétaux. Dans le dernier cas, les animaux ont en tout cas le choix entre diverses parties de la plante.

Dans le cas des animaux qui pâturent, il existe de nettes différences entre la composition botanique du menu et celle de l'offre fourragère (II.4.5.2). D'une manière générale, les animaux choisissent et sélectionnent les meilleures parties d'une offre hétérogène, ceci ressort également de la comparaison entre la qualité du menu et la composition moyenne du fourrage. La plupart du temps, le menu présente une plus grande digestibilité et un plus grand taux d'azote et de minéraux (voir par exemple Diallo, 1978).

L'existence de la sélectivité complique l'estimation de la productivité animale pour une offre donnée. En effet, même dans le cas d'une répertorisation précise des fourrages présents et de leur qualité, le choix des animaux et, par conséquent, leur ingestion d'énergie reste incertain. Pourtant, même dans ces circonstances, il est possible de fixer les limites de la productivité escomptée, pour autant que les conditions suggérées dans II.4.5.2 soient remplies :

- l'offre totale en fourrage doit être subdivisée en un nombre de composants, que l'animal est en mesure de distinguer physiquement ;

- la quantité et la qualité doivent être définies par composant.

Lorsqu'est connu le nombre d'animaux bénéficiant de la totalité de l'offre fourragère, la quantité de chaque composant disponible par animal est automatiquement fixée. On peut supposer que la consommation se porte d'abord sur les fractions les meilleures avant de se reporter sur celles de qualité moindre.

Même lorsque seule la composition moyenne de l'offre est connue, il est possible, dans certains cas, de calculer comment se comporte la répartition entre les composants de qualité, les moins bons ou ceux de faible valeur. Comme il a déjà été dit dans II.4.5.2, ce calcul s'effectue sur la base du profil de qualité de la strate herbacée, qui répond à certaines lois scientifiques (voir III.4.3). Il ressort par exemple de la figure II.20, qu'une strate herbacée d'un taux moyen d'azote de 5 g/kg, se compose pour environ 50 % de matière avec un taux moyen d'azote de 7 g/kg, mais pour 40 % environ de matière avec un taux moyen d'azote de 8 g/kg. Il est ainsi possible de calculer la qualité maximum du menu compte tenu de la quantité disponible par jour, par mois ou par saison, pour les animaux qui se nourrissent de la strate herbacée (bovins). La production animale peut ensuite être estimée. Un exemple concret est présenté dans II.5.6 .

L'ingestion du fourrage est un processus important dans la détermination de la productivité du bétail. Un certain nombre de caractéristiques dans l'ingestion ont leur importance :
- L'ingestion des fourrages difficilement digestibles est faible et celle des fourrages facilement digestibles est élevée. L'ingestion d'énergie à partir des différents fourrages varie ainsi fortement en fonction de la qualité. Les fourrages peuvent donc être classifiés selon le critère de qualité de vie de l'animal : l'animal peut-il vivre au niveau d'entretien, ou bien en-dessous ou au-dessus de celui-ci (II.5.2).
- Pour un faible niveau de production, de petites différences dans la qualité moyenne de la nourriture ont peu d'influence sur l'ingestion mais une influence relativement importante sur la productivité.
- L'ingestion de nourriture chez les animaux dans les pâturages est difficilement mesurable, surtout dans les systèmes extensifs.

Bien que l'ingestion de nourriture soit un processus important, on se demande dans quelles circonstances les frais et les efforts entraînés par les mesures de celle-ci se justifient réellement. Les différences dans l'ingestion seront souvent de peu d'importance et, par conséquent, il sera difficile de les prouver. La réponse dépendra à nouveau de la formulation précise de la problématique.

L'ingestion peut également être évaluée. En fonction de l'objectif recherché, ceci doit se faire avec plus ou moins de précision. S'il s'agit de déduire la production par animal à partir de l'ingestion, il est absolument nécessaire de relier l'ingestion à la qualité du fourrage. Pour les bovins, les rapports entre, d'une part l'ingestion, et d'autre part la digestibilité et le taux d'azote, ont été établis dans III.3.2. Les chiffres du tableau III.15 se réfèrent à des bovins en phase de croissance, et sans production de lait. Pour les vaches en lactation, l'ingestion d'un même fourrage est supérieur d'environ 20 %. Le tableau III.15 montre que la différence dans l'ingestion entre un fourrage de très mauvaise qualité et un fourrage de très

bonne qualité peut être d'un facteur 2, ou bien pour un animal de 250 kg, une ingestion journalière de respectivement 1,5 et 3,0 % du poids du corps.

Pour le calcul global du besoin en nourriture d'une population de bétail se composant de diverses espèces d'animaux, on utilise souvent une ingestion de 2,5 % du poids du corps, ou bien 6,25 kg de matière sèche par UBT et par jour. Pour la réalité des pays sahéliens, ces valeurs pourraient bien être trop élevées compte tenu des différences entre les espèces animales, les catégories animales à l'intérieur d'une espèce et la faible qualité du fourrage en moyenne.

L'ingestion par les animaux plus petits, est plus élevée par kg de poids du corps que celle des grands animaux ; à l'intérieur d'une espèce, les animaux plus jeunes et donc plus légers ont également une ingestion plus élevée par kg de poids que les animaux plus vieux et plus lourds. Par ailleurs, on a déjà souligné que les animaux en lactation mangent plus par kg de poids que les animaux de même poids ne fournissant pas de lait.

Les chiffres d'ingestion pour les génisses, mentionnés dans le tableau III.15, correspondent ainsi à une ingestion de 2,2-2,3 % du poids du corps d'un animal moyen (voir tableau I.24). Dans les pays sahéliens, ce poids moyen est d'environ 175 kg, et dans des conditions d'alimentation très défavorables 150 kg. Ceci correspond donc à 0,7 ou 0,6 UBT, une valeur qui est pratiquement identique a celle qui résulte du facteur de conversion de Le Houérou & Hoste (1977) : un bovin moyen pèse 250/1,5 = 166 kg. L'ingestion journalière par UBT est donc estimée ici à 2,2-2,3 % du poids du corps, c'est-à-dire 5,5-5,75 kg/jour. Ce montant représente donc 10 % de moins que la valeur supposée en général (6,25 kg/jour). Ce montant est également inférieur à la valeur calculée à partir du tableau III.15 pour un animal vivant de 250 kg. Ceci est compréhensible, car une population se compose en moyenne d'animaux plus jeunes, plus légers, et d'animaux en lactation, qui présentent tous une ingestion relativement plus élevée.

La question de savoir s'il faut tenir compte et comment de la sélectivité en matière de quantité et de qualité du fourrage ingéré, dépend de la situation et de l'objectif poursuivi. Trois situations peuvent se présenter :

a. Tout le fourrage est consommé ; à la fin de la saison sèche, les pâturages sont (pratiquement) nus.

b. Une fraction du fourrage disponible est consommée :
   b1. l'évaluation des pâturages a été réalisée selon II.2 ou II.3 ;
   b2. l'évaluation des pâturages a été réalisée selon II.4 , fiabilité élevée de la caractérisation du pâturage.

Dans les cas a et b1, une seule valeur peut être utilisée pour la quantité ingérée, tant que le besoin ne dépasse pas la disponibilité. La valeur moyenne est supposée à 2,25 % du poids vif ; en d'autres termes, l'ingestion de matière sèche par UBT est de 5,6 kg/jour ou de 2050 kg/an. Cette valeur peut également être utilisée dans le cas b2, à moins de désirer une estimation précise du potentiel de production, ventilé suivant le fumier, la viande et/ou le lait, et qu'il soit question (ou qu'il y ait la possibilité) d'exercer un contrôle sérieux sur l'exploitation des pâturages concernés. Dans ce cas, la quantité de fourrage ingérée

est déterminée par rapport à la qualité (tableau III.15). Dans la réalité des pays sahéliens, les valeurs moyennes varieront entre 5,5 à 6,0 kg/jour pour une UBT (2,2 à 2,4 % du poids vif ; tableau I.24), ou bien 2000 à 2190 kg/an. Ce n'est que lorsque la disponibilité en concentré de qualité est suffisante pour faire passer le taux moyen d'azote de la quantité ingérée au-dessus de 12 g/kg et la digestibilité moyenne au-delà de 59 %, qu'il sera question d'une ingestion plus importante. Compte tenu de la qualité des pâturages pendant la saison des pluies, les ingestions plus élevées peuvent également se produire temporairement, même en l'absence de concentré : de juillet à octobre dans le nord du Sahel, en juillet et août dans le sud du Sahel, et de mai à juin dans la savane (figure II.17, combiné avec III.3.1). Lorsqu'on souhaite préciser l'ingestion par jour, semaine ou mois, il faut donc également utiliser le tableau III.15.

La qualité moyenne du fourrage ingéré dans la situation a, est égale à celle du pâturage. Mais dans le cas d'une pâture en liberté, la sélection fait que la qualité varie plus au cours de l'année que celle d'une végétation non perturbée. La situation a s'applique rarement à une forme durable d'élevage : du point de vue de la quantité et de la qualité, l'ingestion est inférieure au besoin pendant une grande partie de la saison sèche, à l'exception peut-être du nord du Sahel.

Dans le cas b, la qualité dépend de la fraction de fourrage disponible réellement ingérée. Celle-ci est ou bien calculée à partir de la disponibilité en fourrage et de l'importance du cheptel, ou bien déduite du caractère (fumier, viande ou lait) et du niveau de la production animale. Dans les deux cas, on suppose que le bétail sélectionne la meilleure partie du fourrage disponible. Si la fraction consommée est connue, la qualité peut être estimée dans le cas b1 à l'aide des figures II.20 et II.23, éventuellement par le biais de l'extrapolation, ce qui permet ensuite de déterminer la production animale pour une intensité d'exploitation donnée. Dans le cas b2, où l'on tente de déterminer l'intensité d'exploitation maximale pour obtenir le niveau de production désiré, il est également possible d'utiliser le profil de qualité fixé individuellement (II.4.5.2). Ceci est notamment utile dans des périodes et à des endroits où il est aisé de sélectionner les parties des plantes ou les espèces, telles les épis de *Blepharis linariifolia*, les feuilles de millet et de sorgho, la repousse des espèces pérennes, etc.

Cette approche est illustrée dans II.5.6. La figure II.23 est également utilisée dans des situations où le menu comprend aussi du fourrage ligneux, bien que cette figure découle d'observations faites sur la strate herbacée, tout comme la figure II.20 (III.4.3).

II.5.4. Croissance, production laitière et reproduction

La croissance, la production laitière et les caractéristiques reproductives découlent toutes trois de l'ingestion d'énergie. En ce qui concerne la croissance, il s'agit de l'ingestion momentanée d'énergie ; dans le cas de la production laitière et plus encore pour les caractéristiques reproductives, c'est non seulement cette ingestion qui joue un rôle, mais également la situation fourragère à plus longue échéance. Ces dernières grandeurs sont en effet plus difficilement prévisibles.

Dans III.3, les caractéristiques mentionnées ci-dessus sont reliées à l'ingestion d'énergie. Pour utiliser ces rapports, il faut connaître la digestibilité et le taux d'azote du menu. Les moyennes mensuelles sont

suffisamment détaillées pour ce faire. Ces moyennes sont mentionnées dans le tableau I.22, où figurent également les gains de poids annuels pour différentes zones, sur la base d'une génisse de 150 kg de poids vif. Sur cette base, les estimations suivantes peuvent être effectuées : âge de la génisse au moment du premier vêlage, intervalles de vêlage et production de lait. Ceci n'est cependant possible que lorsque les conditions fourragères de toutes les catégories d'animaux sont identiques ; voir pour cela tableau I.23 ou les informations contenues dans III.3.4 et III.3.5. Par ailleurs, ces évaluations sont basées sur les caractéristiques d'une race bovine de taille moyenne. Pour les races plus petites ou plus grandes, quelques adaptations sont nécessaires, mais aucune différence du point de vue qualitatif n'apparaîtra. Compte tenu de ces conditions secondaires, la variation annuelle de poids net de génisses peut être utilisée pour caractériser la qualité des pâturages, et à partir de là, caractériser la production du troupeau tout entier (II.5.5).

La qualité du menu est déterminée par la qualité moyenne de l'offre fourragère totale et le degré de sélectivité du bétail. Lors du calcul de la croissance annuelle pour les diverses zones climatiques (tableau I.22), on suppose que dans le nord du Sahel, la composition du menu concorde avec la composition moyenne de la strate herbacée. Pour les autres zones on suppose que :
- dans la première moitié de la saison de croissance, la composition du menu est identique à la composition moyenne de l'herbe encore jeune ;
- dans la seconde partie de la saison de croissance, la composition du menu concorde avec celle des feuilles des espèces herbacées formées à ce moment : de telles feuilles présentent dans des conditions d'une croissance limitée par l'azote, un taux d'azote de 10 g/kg au maximum ;
- pendant la saison sèche, le bétail parvient à sélectionner un menu avec un taux d'azote de 7 g/kg.

Dans les quatre zones, une éventuelle contribution des pâturages aériens n'a pas été prise en considération. Ces suppositions semblent réalistes pour des bovins à intensité de pâturage légère. Les différentes densités de bétail, c'est-à-dire les différences d'intensité de pâturage, influencent les possibilités de sélectivité et ainsi la vitesse de croissance. Les observations sur le terrain sont donc souhaitables afin de déterminer la composition du menu au cours du temps, dans des cas spécifiques (II.4.5.2).

Une évaluation plus globale de la croissance annuelle, est possible en subdivisant l'année en saisons et non en mois, et en jugeant par saison la modification possible du poids. Tout comme pour le tableau I.22, il faut utiliser la figure III.24 pour calculer le gain de poids moyenne par jour pour les diverses saisons, en fonction du taux d'azote estimé du fourrage ingéré. La durée de la saison de croissance de la strate herbacée limite en règle générale la période pendant laquelle la croissance des animaux est possible, à l'exception du nord du Sahel. Dans les autres zones climatiques, il est tout au plus possible de maintenir le poids pendant la saison sèche, mais la perte de poids sera la norme. Cela signifie que pour une saison de croissance de, par exemple, 11 semaines (sud du Sahel), et pour un taux moyen d'azote de 15 g/kg du menu couvrant toute la période, on obtient un gain de poids de 38 kg pour une génisse de 150 kg.

Ensuite, on peut juger de la probabilité qu'ont les animaux de constituer pendant la saison sèche, un

menu de qualité suffisante pour assurer leur entretien. Pour cela, il faut disposer d'informations concernant le taux d'azote de la strate herbacée et concernant l'utilisation du fourrage ligneux par le bétail. Si le menu ne peut atteindre un taux d'azote de plus de 8 g/kg, une perte de poids intervient. Il ressort de la figure III.24, que chaque gramme d'azote que le menu contient moins par kg, que la valeur limite de 8 g/kg, entraînera une perte de poids de presque 0,1 kg par jour pour une génisse de 150 kg. Sur une période de 41 semaines, cela donne un total de presque 25 kg. La modification de poids sur la base annuelle dépend donc fortement de la perte de poids pendant la saison sèche.

Les résultats de telles estimations sont fortement dépendants des systèmes de production en question. S'il s'agit de l'embouche d'animaux mâles, il suffit d'introduire un autre poids métabolique dans le calcul exécuté sur la base de la figure III.24. Lorsqu'il s'agit d'animaux dont le poids est de 250 kg au début de la saison des pluies, le gain de poids sera de 58 kg en 11 semaines. Lorsque ces animaux peuvent bénéficier pendant la saison sèche d'un menu avec un taux d'azote de 7 g/kg, leur perte de poids journalière sera environ de 0,125 kg par jour, soit de 35 kg en 41 semaines.

Les deux exemples se basent sur l'élevage sédentaire dans le sud du Sahel. Les potentialités de la production varient cependant fortement lorsque le troupeau devient transhumant et lorsque diverses zones sont exploitées au cours de diverses périodes de l'année. Le tableau I.22 permet de se faire une idée de l'augmentation de la production, lorsqu'un troupeau pâture depuis le début août jusqu'au milieu d'octobre dans le nord du Sahel, depuis la mi-novembre jusque fin juin dans la savane du nord et utilise les deux mois restants pour les déplacements, tout en pâturant dans le sud du Sahel. Une génisse de 150 kg peut alors grossir de 90 kg dans la période de juin à la mi-octobre ; la perte de poids dans la période restante de l'année serait de 30 kg, et la croissance nette peut donc s'élever à 60 kg !

La situation se présente encore plus favorablement, lorsque le bétail passe la saison sèche dans les zones dominées par les espèces pérennes, telles que G12 et G13/F33 (carte en annexe). A condition que l'intensité de pâturage reste suffisamment limitée pour que seules les feuilles vertes et la repousse soient sélectionnées (II.5.6), le gain de poids résultant de la saison des pluies peut plus ou moins être sauvegardée. Dans le delta intérieur du Niger, cette situation était encore possible en 1976-1977 (Breman *et al*., 1978). Un effet comparable peut être obtenu temporairement, en faisant pâturer le bétail au début de la saison sèche sur les champs après la récolte, en utilisant les feuilles de céréales facilement sélectionnable et les mauvaises herbes encore vertes (Dicko & Sangaré, 1984 ; Leloup & Traoré, 1989).

Dans la savane, où le taux moyen de la strate herbacée diminue jusqu'à 3,5 g/kg pendant la saison sèche (figure II.17), même les bovins consommeront un menu de taux d'azote plus élevé grâce aux feuilles et aux fruits d'espèces ligneuses encore vertes. Il est également possible d'utiliser des sous-produits agricoles de haute qualité, mais la disponibilité en est souvent encore très limitée. Sur la moitié méridionale du trajet choisi comme exemple, on rencontre beaucoup de rizières irriguées (G20, carte en annexe). La superficie totale de plus de 30.000 ha fournit presque 5000 tonnes de son et de farines basses, avec un taux d'azote moyen de 10 g/kg. Il s'agit là d'une quantité si réduite qu'elle peut à peine compléter plus de la moitié du manque d'azote du ranch de Niono pendant la saison sèche, permettant ainsi d'atteindre le niveau d'entretien. Dans II.4.5.2 dans le sous-paragraphe « Disponibilité », un calcul

démontre que, pour l'élevage des bovins, un hectare de pâturage du Ranch fournit, pendant la saison sèche, 760 kg de fourrage avec un taux d'azote moyen de 5,9 g/kg. Avec les sous-produits du riz, 4762 tonnes de ce fourrage peuvent être transformées en un menu avec un taux d'azote de 8 g/kg, ce qui permet de couvrir les besoins d'entretien. Ceci correspond au fourrage fourni par 6265 sur les 11.000 hectares.

Des estimations comme celles-là peuvent aisément être vérifiées en pesant périodiquement les animaux. Compte tenu de l'importance de la croissance animale dans l'évaluation des pâturages, il est donc conseillé d'intégrer le pesage du bétail dans le travail sur le terrain.

II.5.5. Productivité des troupeaux de bovins

Il est utile dans le cadre de l'évaluation des pâturages, d'examiner la productivité des troupeaux. Comparé aux animaux pris individuellement, le troupeau présente, en tant qu'unité biologique, un certain nombre de caractéristiques spécifiques. Ainsi, la production du troupeau est constituée par la croissance des animaux pris séparément, mais également par le lait, par la force de traction et par l'accroissement (ou la diminution) de sa population. De plus les influences de la disponibilité et de la qualité du fourrage se répercutent de manière complexe dans le comportement d'une population, et de telle façon que les influences positives se renforcent mutuellement, mais également les influences négatives. Ce problème a été longuement analysé dans I.3.6 : une légère amélioration des conditions alimentaires exerce un effet positif sur la vitesse de croissance, anticipe le moment du premier vêlage, raccourcit les intervalles de vêlage et augmente la production de lait. Il en résulte que la production moyenne par animal augmente relativement plus vite que chacun des paramètres de production individuelle. L'inverse est également vrai.

Cet état de choses parle plutôt en faveur de l'utilisation d'un troupeau composé de diverses catégories d'animaux au lieu d'une seule catégorie pour les expériences de pâture. Mais dans la pratique, ceci se heurte à de grands problèmes, aussi donne-t-on la préférence à des animaux mâles castrés, la vitesse de croissance étant utilisée comme mesure de la productivité. Les vaches adultes sont utilisées beaucoup plus rarement. Et pourtant, dans de nombreux systèmes d'élevage, les paramètres de production pour ces catégories d'animaux, la production de veaux et de lait, sont plus importants que le gain de poids annuelle des animaux mâles. Une partie des objections liées au travail avec cette dernière catégorie d'animaux peuvent être supprimées lorsque la productivité des autres catégories d'animaux peut être déduite de celle des animaux mâles selon des rapports fixes. Cette méthode est en principe possible, III.3.4 et III.3.5 le démontrent, mais elle ne constitue cependant pas une véritable alternative à l'étude sur un troupeau.

Les calculs sur la base d'un modèle de troupeau peuvent répondre à un certain nombre de questions, à savoir :
- quelle est la signification des variations dans les paramètres de production individuels pour la production moyenne par animal ou pour l'accroissement possible par an ;
- les mesures ou les suppositions relatives à la mortalité, à la fécondité et à la durée de vie, sont elles en

accord avec les données concernant la croissance de la population ;
- quel est l'effet des améliorations dans l'alimentation sur la productivité moyenne ;
- quel est l'effet des améliorations de l'état de santé ;
- quel est le moment optimal pour la vente des animaux mâles, et des animaux femelles ?

Des descriptions du comportement des populations de bétail en tant que fonction des modifications dans les paramètres individuels de productivité peuvent être trouvés dans la publication de Dahl & Hjort (1976) et de Tacher (1975a et b). Des applications peuvent également être trouvées dans la publication de Breman & Traoré (1987).

L'un des problèmes que l'on rencontre en effectuant des calculs sur la productivité du troupeau est le choix des paramètres. Ces paramètres de croissance, de reproduction, de mortalité et de vente, doivent être choisis de manière à représenter de façon réaliste les différences dans la situation alimentaire et la gestion du troupeau. Dans ce manuel, les valeurs d'un certain nombre de paramètres importants sont liés aux conditions d'alimentation. Pour les risques de mortalité cela ne s'est pas avéré possible. Ces paramètres ont été considérés comme constant dans les calculs de la productivité des troupeau figurant dans I.3.6.

Les grandes différences dans la productivité du troupeau par suite de variations alimentaires (tableau I.24) prouvent bien la sensibilité des résultats par rapport aux valeurs choisies pour les paramètres. Pour chaque situation, les valeurs des paramètres devront à nouveau être estimées sur la base des données en provenance de la pratique de l'élevage, des données en provenance des stations expérimentales, ou des directives développées dans III.3 . Dans le cas d'incertitude au sujet de la valeur de certains paramètres, il est utile d'analyser la sensibilité des résultats des calculs par rapport aux variations de ces valeurs.

L'application d'un modèle de troupeau est illustrée de trois manières : à l'aide du calcul de la production totale du troupeau, à l'aide de l'analyse de la viabilité d'un troupeau et à l'aide d'une analyse de l'effet de la gestion du troupeau sur le rapport de production du lait et de la viande.

Le premier exemple concerne une situation traitée précédemment dans I.3.6 et dont le tableau I.24 donne les résultats définitifs. Il s'agit d'un troupeau dans lequel les animaux grandissent annuellement de 50 kg en moyenne après leur première année, dans lequel les vaches vêlent la première fois dans leur quatrième année et où l'intervalle de vêlage est de 17 mois (pourcentage de vêlage 71 %, donc environ trois veaux tous les quatre ans). Le pourcentage de mortalité est de 20 % pour les animaux d'un an, de 5 % pour les animaux entre 1 et 2 ans et de 2 % pour les animaux de plus de 2 ans. De plus, tous les velles qui ne sont pas nécessaires au r des vaches adultes (qui meurent ou qui sont vendues à la fin de leur 10ème année) sont vendus à la fin de leur première année. On suppose également que tous les veaux mâles sont vendus à cet âge. La situation correspond donc à celle d'une entreprise laitière qui garde son nombre d'animaux constant. La description de la structure du troupeau est ainsi simplifiée. Au total, on distingue 11 catégories d'âge, depuis 0 à 1 an jusqu'à 10 à 11 ans. Le nombre d'animaux par catégorie peut être déterminé de la façon la plus aisée en partant d'un nombre arbitraire de 100 animaux dans la catégorie fertile la plus jeune, celle de 3 à 4 ans. Lorsque les nombres sont stables, 98 animaux se

trouvent alors dans la catégorie de 4 à 5 ans ; en effet, sur les cent animaux qui se trouvent une année dans la catégorie des 3 à 4 ans, il y en a deux qui meurent. Le calcul se fait de la même façon pour les nombres dans les catégories plus âgées. Pour les catégories plus jeunes le calcul se fait à l'envers : pour chaque groupe de 100 animaux dans la catégorie des 3 à 4 ans, il doit y avoir 102 animaux dans la catégorie des 2 à 3 ans, puisque 98 % survivent. De la même manière on aboutit pour les catégories de 1 à 2 ans et de 0 à 1 an à respectivement 107 et 134 animaux. Le nombre de velles qui naissent chaque année est de (0,5 × 0,71 (100+98+96+94+92+90+88+86)) = 264. Ceci signifie un surplus de 264-134 = 130 velles dont 130 - 0,20 × 264 = 77 peuvent être vendus à l'âge de 1 an. 53 veaux et 53 velles meurent déjà avant d'atteindre l'âge d'un an. Le nombre total d'animaux dans ce troupeau juste avant le moment de la vente des veaux est de 1402, incluant 211 veaux mâles. Pour un troupeau stable de 1000 animaux, il faut diviser tous les chiffres par 1,4.

Sur la base du nombre total d'animaux et de la structure du troupeau, la production totale du troupeau peut être calculée à l'aide des données du tableau I.23.

Le second exemple concerne une situation où l'observation porte sur d'éventuelles modifications dans l'effectif. Les données qui s'y rapportent proviennent de l'étude de Wagenaar *et al.* (1986) effectuée parmi les éleveurs du delta central du Niger au Mali. Le tableau II.31 donne les paramètres pour le troupeau dont la mortalité de veaux est la plus élevée, à savoir 43 %.

Tableau II.31
Paramètres zootechniques pour un troupeau de bovins de Diafarabé, dans le delta central du Niger (Mali), datant des années 1979-1982 (Wagenaar et al., 1986).

	nombre (% du total)	pourcentage de vêlage (%)	mortalité (%)	vente (%)
catégorie d'âge (ans)				
0-1	10	0	43	0
1-2	10	0	5	0
2-3	12	0	5	0
3-4	12	36	5	0
4-5	12	47	8	0
5-6	11	57	8	0
6-7	8	57	8	0
7-8	6	57	8	0
8-9	5	57	8	0
9-10	5	57	8	0

10-11	4	50	8	23
11-12	3	50	8	46
12-13	2	50	8	69
13-14	1	50	8	92

La question qui peut se poser est de savoir dans quelle mesure les paramètres mesurés, basés sur une période de 4 ans, peuvent à terme être compatibles avec la survie du troupeau. Y a-t-il dans le cas d'une telle mortalité des veaux, suffisamment de croissance pour remplacer les animaux qui disparaissent du troupeau par suite de mortalité ou de vieillesse ?

Les observations concernant l'exclusion des vaches âgées ne sont pas complètes. On suppose que la vente s'effectue progressivement entre leur 10 ème et 14ème année. Le pourcentage des animaux de plus de 10 ans dans le troupeau semble concorder avec cette hypothèse.

Sur la base de la pyramide des âges (tableau II.31), l'évolution de la partie femelle du troupeau a été observée dans le temps, à partir d'un nombre initial de 1000. La procédure est la suivante : à partir d'une situation de l'année « t », il s'agit de calculer la situation de l'année « t+1 ». Ce calcul s'effectue en commençant par calculer le nombre de veaux qui naîtront dans l'année « t » ; au cours de l'ann ée « t+1 », ils constituront la catégorie 0 à 1 an. Ensuite, tous les animaux sont transférés vers la catégorie d'âge suivante après avoir pris en compte le taux de mortalité et la vente. Le tableau II.32 signale que 171 velles naissent dans l'année 0 ; pendant l'année 1, ces veaux se trouvent dans la catégorie 0 à 1 an. Les veaux de l'année zéro sont à présent devenus des veaux âgés d'un an. Compte tenu de la mortalité de 43 %, il en reste 56 sur les 99 d'origine. Cette méthode de calcul est appliquée à chaque catégorie d'âge. Toute la procédure est ensuite répétée pour les années suivantes. D'autres méthodes de calcul peuvent être appliquées mais la méthode en question ne demande que de la simple arithmétique. Une calculatrice programmable peut constituer une aide précieuse.

Le tableau II.32 montre que, dans les conditions données, on peut s'attendre pendant les premières années à un léger accroissement du nombre d'animaux du troupeau. Ensuite, la population diminue en importance. Visiblement dans la situation de départ, les vaches adultes étaient surreprésentées. Ceci apparaissait déjà dans la pyramide des âges du tableau II.31 : les catégories d'âge les plus jeunes comportaient trop peu d'animaux par rapport au reste. Visiblement, on constate ici une détérioration récente des conditions pour le troupeau, qui, si elles persistent, entraîneront une diminution de l'effectif.

Tableau II.32
Sur une période de 25 ans, évolution des femelles dans un troupeau de bovins, sur la base de la pyramide des âges du tableau II.31.

catégorie d'âge (ans)

ans	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	nombre total	vitesse de croissance
0	99	102	123	119	121	106	77	61	46	51	43	27	17	8	1000	
1	171	56	97	119	113	111	98	71	56	42	47	30	12	4	1027	1,027
2	179	97	54	92	111	104	102	90	65	52	39	32	14	3	1034	1,007
3	182	102	92	51	87	102	96	94	83	60	48	27	15	3	1042	1,008
4	177	104	97	88	48	80	94	88	87	76	55	33	12	3	1042	1,000
5	174	101	99	92	83	45	74	86	81	80	70	38	15	3	1041	0,999
6	172	99	96	94	87	77	41	68	80	74	73	48	18	3	1030	0,989
7	170	98	94	91	89	80	71	38	63	73	69	51	22	4	1013	0,983
8	166	97	93	90	86	82	74	65	35	58	67	47	23	5	988	0,975
9	161	95	92	88	85	79	75	68	60	32	53	46	22	5	961	0,973
10	157	92	90	87	84	78	73	69	63	55	29	37	21	5	940	0,978
11	155	90	87	85	83	77	72	67	64	58	51	20	17	5	931	0,990
12	154	88	85	83	81	76	71	66	62	59	53	35	9	4	926	0,995
13	155	88	84	81	79	75	70	65	61	57	54	37	16	2	924	0,998
14	154	88	84	80	77	73	69	65	60	56	52	37	17	4	916	0,991
15	152	88	84	79	76	71	67	63	59	55	52	36	17	4	903	0,986
16	149	87	83	80	75	70	65	61	58	55	51	36	17	4	891	0,987
17	147	85	82	79	76	69	64	60	57	54	50	35	16	4	878	0,985
18	145	84	81	78	75	69	64	59	55	52	49	35	16	4	866	0,986
19	143	83	80	77	74	69	64	59	54	51	48	34	16	4	856	0,988
20	141	82	78	76	73	68	64	59	54	50	47	33	16	4	845	0,987
21	139	80	77	75	72	67	63	59	54	50	46	32	15	4	833	0,986
22	138	79	76	74	71	66	62	58	54	50	46	32	15	3	824	0,989
23	136	79	75	73	70	65	61	57	53	50	46	32	15	3	815	0,989
24	135	78	75	72	69	64	60	56	52	49	46	32	15	3	806	0,989
25	133	77	74	71	68	63	59	55	51	48	45	31	15	3	793	0,984

La productivité de l'élevage bovin dans la région, pour différents niveaux d'alimentation, est indiquée dans I.3.6. On y spécifie les possibilités (en fonction de la situation fourragère) d'influencer, à l'aide d'une politique de vente, la composition du troupeau, de manière à optimaliser la production de lait ou de viande (tableau I.24). Le modèle employé est utilisé aussi pour réaliser la figure II.22. Elle permet à partir de la croissance annuelle nette d'une génisse (II.5.4), d'estimer la production d'un troupeau. Cette

croissance annuelle nette caractérise donc la situation fourragère, les quatre niveaux du tableau I.24 étant remplacés par une échelle continue ; les niveaux fourragers I, II, III et IV du tableau correspondent au gain de poids net d'une génisse avec au départ un poids de 150 kg, soit un gain de respectivement 25, 50, 75 et 100 kg/an dans la figure. Pour d'autres paramètres concernant les pâturages et les troupeaux, il faut consulter le tableau. Les parties a et b de la figure correspondent à a et b du tableau, c'est-à-dire que l'objectif principal de production est la viande ou le lait.

Figure II.22

Production moyenne de lait (----) et de poids vif (—) par animal, pour un troupeau géré de manière à obtenir une production maximale de viande (a) ou de lait (b). Cette production est présent ée par rapport à la situation fourragère, étant exprimée par la croissance annuelle nette d'une génisse d'un poids de départ de 150 kg

II.5.6. Capacité de charge des pâturages

II.5.6.1. Introduction

La capacité de charge des pâturages est dépendante de tout un complexe de facteurs. L'évaluation des pâturages peut donner une idée de cette capacité de charge, la méthode est indiquée dans II.4.5.2 . Les suggestions ci-dessous permettent de transposer les observations en question en jugements quantitatifs. Il ressort de la justification de III.4 que de tels jugements doivent être faits avec prudence.

Pour quantifier la capacité de charge, il faut tenir compte de trois aspects :
- la situation fourragère, c'est-à-dire la disponibilité et la qualité du fourrage tout au long de l'année ;
- la norme de production animale, c'est-à-dire la mesure dans laquelle le fourrage disponible peut être mis à profit, compte tenu de la spécificité et du niveau de la production animale recherchée ;
- la norme de l'environnement, c'est-à-dire la mesure dans laquelle le fourrage disponible peut être mis à profit sans porter atteinte à la disponibilité et à la qualité du fourrage pour l'avenir.

Les grandeurs déterminées par la méthode présentée ont une valeur pratique directe pour les pâturages dont l'exploitation n'est pas compromise par l'absence d'eau potable.

Le rapport entre la production annuelle de biomasse et la situation fourragère a été traité en détail dans II.4.5.1 et 2. Lors d'évaluations comme celles décrites dans II.2 et II.3, il s'avérera souvent impossible de déterminer tous les paramètres, même ceux qui sont indispensables pour déterminer la capacité de charge. Dans ce cas, on suggère d'utiliser les valeurs moyennes pour ces paramètres. Quelques unes de ces valeurs moyennes déterminantes ont été traitées ci-dessus.

Lors de l'exploitation pendant la saison des pluies, 50 % de la biomasse de la strate herbacée peut être considérée comme disponible en tant que fourrage. Lors de l'exploitation pendant la saison sèche ou pendant toute l'année, ce pourcentage sera de 35 % en l'absence de feux. Dans le cas de feux incontrôlés, les pertes de biomasse qui en découlent doivent être prises en considération. On suppose que ces pertes

augmentent de façon linéaire depuis 0 % pour une production annuelle de 700 kg/ha de matière sèche, jusqu'à en moyenne 60 % pour une production de 5000 kg/ha ou plus.

Sans informations sur la composition de la strate ligneuse, la disponibilité fourragère de la strate herbacée seule peut donner une indication de la situation fourragère des herbiphiles (bovins) ; la disponibilité fourragère de l'ensemble de la strate herbacée et de la strate ligneuse peut donner une indication de la situation des ligniphiles (chèvre, dromadaires). Pour les bovins, on sera d'une manière générale plus proche de la réalité en incluant dans le menu 20 % du fourrage ligneux disponible et accessible. La connaissance de la composition floristique et de l'appétibilité (IV) permet d'obtenir une plus grande précision. Pour les herbiphiles, il suffit de tenir compte des espèces ligneuses pendant la saison sèche. La disponibilité des feuilles et des fruits est alors estimée à 30 % de la production annuelle. Un tiers sera accessible pour le bétail dans le Sahel, et un quart dans la savane.

Par la suite, trois différentes capacités de charge seront traitées, chacune avec un objectif d'utilisation particulier. La différence apparaîtra dans les fractions de la production annuelle de la strate herbacée et de la strate ligneuse qui peuvent réellement être utilisées. Aucune suggestion n'est faite dans le sens d'une adaptation de la production annuelle dans le cas de différences dans les fractions utilisables. Cette adaptation peut paraître logique pour des régions avec une infiltration de plus de 250 mm/an, car la fraction d'azote dans la biomasse perdue par suite de la pâture, y est l'une des variables nécessaires pour évaluer la production annuelle (voir entre autres II.3.4 et III.2.2.2). Pourtant cette adaptation n'a pas été effectuée ; les explications à ce sujet se trouvent dans III.4.4.2.

II.5.6.2. Capacité de charge standard

Pour permettre une comparaison des pâturages entre-eux, une « capacité de charge standard » a été définie en tant que « degré d'occupation maximum des pâturages, pour un élevage sédentaire tout au long de l'année pendant une année à pluviosité moyenne permettant de garantir la viabilité du troupeau ». Ce dernier critère signifie qu'une génisse de 150 kg devra présenter un gain de poids annuel net de 25 à 30 kg, et il permettra de déterminer quelle fraction du fourrage disponible est utilisable du point de vue qualitatif (III.4.3). Pour une estimation globale, ou lorsque la qualité des données de départ ne permet pas un calcul plus précis, cette fraction peut être assimilée à la fraction du fourrage qui présente un taux d'azote de 7,5 g/kg ou plus. Lorsque le taux d'azote moyen est connu, cette fraction peut être obtenue à partir de la figure II.23.

Figure II.23
Fraction supérieure avec un taux d'azote moyen de 7,5 g/kg, par rapport au taux d'azote moyen de la biomasse.

Pour calculer la capacité de charge, il faut tout d'abord déterminer pendant quelle période de l'année le taux est inférieur à 7,5 g/kg, et pendant quelle période il ne sera donc pas possible d'utiliser la totalité du fourrage. Si aucun profil de qualité n'a été établi au cours de l'année (II.4.5.1 et 2), la règle selon laquelle dans le nord du Sahel le taux d'azote reste toute l'année au-dessus de 7,5 g/kg (tout le fourrage

disponible peut donc être utilisé) peut être appliquée. Mais dans le sud du Sahel et dans la savane du nord et du sud, ceci n'est le cas que 9, 8 et 6 mois respectivement. Pour le reste de l'année, la fraction utilisable peut être calculée sur la base du taux d'azote du fourrage disponible au début de la saison sèche, compte tenu de la perte d'azote au cours de la saison sèche (équation II.8). Ce calcul a déjà été effectué dans II.4.5.2 pour une production animale plus élevée, la limite inférieure étant représentée par un taux d'azote de 8 g/kg. Il s'agissait du Ranch de Niono, dont la matière sèche disponible à partir de la strate herbacée était de 910 kg/ha, et la matière sèche du pâturage aérien, dans le cas de bovins, était de 80 kg/ha. Lorsque la limite minimum du taux d'azote est de 7,5 g/kg, la quantité de fourrage utilisable monte à 725 kg/ha, alors que cette quantité est de 670 kg/ha pour une limite minimum de 8 g/kg (voir cet exemple pour le calcul).

C'est ainsi que la capacité de charge standard a été calculée pour le Ranch dans son ensemble et pour certaines unités séparément, à l'aide des données de production figurant au tableau II.27. On a tenu compte d'une part, du fourrage ligneux disponible pendant la saison sèche et de son utilité pour les bovins, et d'autre part, de la disponibilité et de l'utilité pendant toute l'année pour un troupeau mixte de bovins, de chèvres, etc. Dans ce dernier cas, les pâturages sont utilisés de manière maximum, car l'utilité relativement importante du pâturage aérien, dû à son taux d'azote élevé, permet d'utiliser une quantité relativement grande de fourrage de la strate herbacée à faible taux d'azote, alors que chaque espèce de bétail s'approprie partiellement des fractions spécifiques de fourrage. Il ressort des résultats présentés dans le tableau II.33, que le Ranch possède une capacité de charge standard pour l'élevage bovin de 2,8 ha/UBT. Si le critère de qualité (taux d'azote du menu de $\geq$ 7,5 g/kg) n'avait pas eu cours, la capacité de charge obtenue aurait été 1,4 fois supérieure : 2050/(910+80) = 2,1 ha/UBT).

Lorsque la qualité est prise en compte, la capacité de charge pour un troupeau mixte est de 1,3 fois supérieur à celui d'un troupeau de bovins (2,1 ha/UBT ; voir tableau). Pour des unités prises individuellement, la différence de capacité de charge entre les bovins et les troupeaux mixtes peut encore être plus importante : pour F46a le facteur est de 1,7 grâce à la quantité de fourrage des espèces ligneuses utilisable.

Tableau II.33
Capacité de charge standard du ranch de Niono et de certaines de ses unités de paysage et disponibilité et qualité fourragère correspondante, pour les troupeaux de bovins et les troupeaux mixtes (paisseurs et brouteurs). Précision de la disponibilité du fourrage des espèces ligneuses. Pluviosité moyenne de 550 mm/an.

	unité			
	F33	F33a	F46a	Ranch
élevage de bovins :				
disponibilité en fourrage (kg/ha) [1)]	810	1200	1000	725
fourrage des espèces ligneuses :				

espèces consommables(%) [2]	60	39	74	59
fraction du menu total	0,01	0,11	0,27	0,11
qualité : [*N*] (g/kg)[3]	5,6	4,9	8,8	5,9
capacité de charge standard (ha/UBT)	2,5	1,7	2,0	2,8
troupeau mixte:				
disponibilité en fourrage (kg/ha)1)	850	1770	1660	955
fourrage des espèces ligneuses :				
espèces consommables(%) [2]	65	59	77	67
fraction du menu total	0,05	0,38	0,56	0,31
qualité : [*N*] (g/kg)[3]	5,6	5,2	8,9	6,0
capacité de charge standard (ha/UBT)	2,4	1,2	1,2	2,1

[1] total annuel ;
[2] contribution des espèces consommables à la production annuelle de feuilles, de tiges et de fruits des espèces ligneuses, pour l'élevage concerné ;
[3] moyenne de la saison sèche.

L'application d'une qualité minimum fixe ne permet pas d'obtenir une très grande précision quand il s'agit de formuler la condition de base pour la capacité de charge standard (garantir la viabilité du troupeau). Ce manque de précision provient des différences de gain de poids du bétail pendant la saison des pluies, dues à la diversité de qualité entre les pâturages. Le tableau I.22 représente bien cet état des choses : dans tous les cas les menus présentent le même taux d'azote minimum ($\geq$ 7 g/kg) alors que la variation du gain de poids net est importante. Ce tableau montre également que la connaissance de l'évolution de la qualité au cours du temps, permet une évaluation plus précise de la capacité de charge, « évaluation précise » dans le sens où on peut obtenir une comparaison plus juste des unités de paysage. Dans le sud du Sahel, par exemple, un gain de poids net de 25 à 30 kg est possible, à condition qu'il n'y ait pas de perte de poids pendant 6 mois sur les 9 mois que dure la saison sèche, au lieu de la perte de 4 kg/mois. Cette absence de perte de poids est possible lorsqu'au cours de ces 6 mois, le taux minimum d'azote du menu est de plus de 8 g/kg au lieu de 7.

Le taux minimum 7,5 g/kg suggéré ci-dessus, sera assez proche de la réalité dans le sud du Sahel et dans la savane du nord.

II.5.6.3. Capacité de charge en fonction du système

La capacité de charge, définie dans II.5.6.2, est utile pour caractériser une zone et les unités de paysage qui la composent. Elle peut également servir à obtenir une première impression quant à la transmissibilité de certains développements technologiques (II.4.5.3). Mais lorsqu'il s'agit de développer des plans de gestion et d'évaluer les possibilités de production, le nombre maximum d'animaux à ne pas dépasser ne constitue pas une donnée très intéressante. La capacité de charge doit alors être fixée en

fonction du système. Pour cela, il faut non seulement tenir compte de la différence déjà mentionnée entre les bovins et les chèvres, mais également des aspects climatologiques, du type de production et de l'objectif de production.

La variabilité de la pluviosité a été soulignée en maints endroits de ce manuel ; elle augmente quand la pluviosité annuelle moyenne diminue. Lorsque la pluviosité diminue, la disponibilité en eau acquiert un rôle plus déterminant pour la production que la disponibilité en éléments nutritifs, c'est pourquoi la variabilité de la disponibilité en fourrage est grande dans le nord du Sahel et considérable dans le sud du Sahel. En l'absence de possibilités pratiques de transhumances à grande échelle, ou d'alimentation supplémentaire, il est préférable de baser la capacité de charge du Sahel proprement dit sur la disponibilité en fourrage pendant une année sèche. Le tableau I.19, par exemple, montre combien la biomasse et donc la disponibilité en fourrage, diminue dans ces conditions : dans le nord du Sahel, cette disponibilité s'élève à moins d'un cinquième de celle d'une année normale, et dans le sud du Sahel, elle est de 65 %. Lorsque le critère de qualité n'est pas préservé pendant une année sèche et qu'on admet que le bétail grandira moins pendant une telle année, la diminution de la capacité de charge n'est pas nécessairement proportionnelle. L'effet est réduit, car lorsque la production diminue, la qualité augmente (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 319-322).

Les conséquences au niveau du Ranch sont données à titre d'illustration. La situation dans l'extrême sud du Sahel, dans l'ensemble fluviatile, permet à l'aide du tableau II.22, de conclure à une disponibilité en fourrage pendant une année sèche d'environ 0,7 fois celle d'une année normale. Les mesures, dont certains résultats ont déjà été présentés dans la figure II.16 , le confirment. La capacité de charge pour les bovins atteint ainsi au minimum 2,8/0,7 = 4,0 ha/UBT. Si le critère de qualité de la capacité de charge standard n'est pas pris en compte pour une année sèche, la capacité de charge sera de 2,1/0,7 = 3,0 ha/UBT, ce qui, pour une année normale répond encore au critère de qualité. Plus au sud, dans la savane, ceci n'est généralement pas le cas ; le taux d'azote des pâturages y est plus faible, alors que la pluviosité pendant une année sèche y diverge moins de la normale. Le critère de qualité de la capacité de charge standard y conduit à un potentiel plus faible que celui basé exclusivement sur la disponibilité en fourrage d'une année sèche ; lorsque la capacité de charge standard est respectée, l'approvisionnement en fourrage pendant une année sèche est également garanti (I.3.4). Le choix du point de transition entre le Sahel et la savane est quelque peu arbitraire. Dans la pratique, ce choix est fortement déterminé par la présence et la possibilité d'utilisation du fourrage des espèces ligneuses et elle est donc également dépendante de l'espèce animale. Pour les chèvres, il est conseillé d'employer la disponibilité fourragère d'une année sèche également comme base de la capacité de charge de la savane (III.4.3).

L'exemple précité concerne toujours le nombre maximum d'animaux possible, compte tenu de la disponibilité en fourrage et de la viabilité du troupeau. Ceci peut constituer une donnée intéressante pour un élevage axé en premier lieu sur l'aide à l'agriculture par la fourniture d'une quantité maximum de fumier. La production laitière est alors nulle et la production de viande minimale (figure II.22 ; niveau de production équivalent à une situation fourragère permettant un gain de poids de 25 kg/an pour une génisse). Lorsque la production de lait et/ou de viande constitue le premier objectif de l'élevage, ce niveau de production n'est économiquement pas rentable. Dans les circonstances économiques actuelles,

on estime qu'il faut un niveau minimum équivalent au gain de poids de 50 kg/an pour une génisse. Pour obtenir ce résultat, il faut conserver une plus faible occupation des pâturages (ou bien l'élevage doit être mobile, ou encore il faut utiliser du fourrage supplémentaire de qualité plus élevée que celui des pâturages pendant la saison sèche ; II.5.4).

Dans l'hypothèse où l'évolution de la qualité des pâturages du Ranch serait équivalente à l'évolution moyenne dans le sud du Sahel, le tableau I.22 permet de déduire que, dans ces conditions, l'élevage sédentaire dans le sud du Sahel doit rendre possible un gain de poids de 6 kg même au mois d'octobre. Ensuite, aucune perte de poids ne pourra intervenir pendant toute la saison sèche qui suit. Ceci signifie que pendant les 9 mois de la saison sèche, le menu doit comporter un taux d'azote de plus de 8 g/kg ; pour les bovins, seule une fraction de moins de 0,62 du fourrage subsistera. Dans le chapitre II.4.5.2, sous le paragraphe « objectif de production », le calcul avait déjà été fait : le fourrage utilisable pour l'année toute entière s'élevait ainsi à 670 kg/ha. La capacité de charge est donc inférieure à 2050/670 = 3,1 ha/UBT, donc moins que la capacité de charge basée sur la disponibilité en fourrage d'une année sèche.

Supposons que la zone dans laquelle est située le Ranch soit uniquement utilisée 2 mois par an, comme étape dans la transhumance des bovins : en juillet pour la transhumance vers le nord, et de la mi-octobre à la mi-novembre pour le trajet vers le sud. En juillet tout le fourrage disponible pourrait être utilisé, et en octobre-novembre, la fraction utilisée serait de 0,8. La disponibilité serait également plus élevée, car le pâturage intensif de courte durée entraîne une diminution des pertes jusqu'à la moitié de la biomasse herbacée produite, par rapport aux 65 % dans le cas d'une exploitation continue. En partant de l'hypothèse selon laquelle l'exploitation de la moitié de la biomasse en juillet (environ 50 kg/ha) n'influence pas de manière significative la production annuelle, la production de la strate herbacée seule entraînerait 0,5 × 2600 = 1300 kg/ha de fourrage disponible en automne, dont 1300 × 0,8 = 1040 kg/ha serait utilisable, alors que les animaux consomment peut-être déjà un peu de pâturage aérien en octobre-novembre. Exprimé en besoin de pâturage par UBT sur une base annuelle (pour une comparaison avec d'autres calculs de capacité de charge), il faut donc moins de 2050/(50+1040) = 1,9 ha/UBT. Pour une utilisation du Ranch comme élément d'un système transhumant, la capacité de charge est donc plus de 1 fois et demi supérieure à celle d'un système sédentaire.

Il apparaît clairement sur la base de ces exemples, que dans d'autres cas également, la capacité de charge peut être déterminée en fonction de l'objectif et du système de production. Il s'agit d'abord de déterminer par période, la qualité minimum requise pour le fourrage, et ensuite il est possible de calculer quelle partie du fourrage disponible est utilisable. Deux cas extrêmes seront brièvement signalés.

Lorsque les pâturages ne servent qu'à nourrir suffisamment les boeufs de labour, la capacité de charge devra se situer légèrement au dessus de la capacité de charge standard (II.5.6.2). Mais pendant les mois de travail, il ne peut y avoir de pertes de poids : au cours de ces mois, le menu devra avoir un taux d'azote de 9 à 10 g/kg. Pendant le labour en mai-juin, il y a donc moins de fourrage que supposé dans II.5.6.2 et la capacité de charge est donc plus faible, à moins qu'il y ait un supplément de meilleure qualité que celle des pâturages à ce moment.

Un niveau de production correspondant à un gain de poids de 50 kg/an pour les génisses, n'est pas rentable lorsque les investissements dans l'élevage s'intensifient ; les animaux ne sont alors pas suffisamment vite productifs (prêt pour l'abattage ou producteur de lait). Il serait bien entendu possible de calculer la fraction du fourrage utilisable pour faire prendre à une génisse un gain de poids de 100 kg/an par exemple, mais il est peu probable que les bovins pâturent avec suffisamment de sélectivité pour obtenir un tel menu. Il faudra donc produire du fourrage ou acheter du concentré comme supplément au fourrage des pâturages de faible qualité. La fin du chapitre II.5.4 exposait comment, pour de telles situations, calculer la superficie de pâturage nécessaire pour réaliser le niveau de production souhaité. Dans l'exemple donné, il est possible sur 6265 ha, d'éviter la perte de poids pendant la saison sèche en l'absence de sélection, mais le gain de poids d'une génisse n'est alors que de 50 kg/an environ (tableau I.22). Si au lieu de sous-produits en provenance de rizeries, avec un taux d'azote de 10 g/kg, on utilisait des tourteaux de coton avec un taux de 65 g/kg, il serait possible d'atteindre 100 kg/an, à condition de faire passer le taux d'azote du menu à 10 g/kg pendant les 9 mois que dure la saison sèche. Par hectare de pâturage, la disponibilité en fourrage étant de 725 kg et le taux d'azote de 5,9 g/kg (moyenne saison sèche : tableau II.33, bovins), il faudrait 54 kg de tourteaux. La capacité de charge du Ranch serait de (2100-54)/725 ~ 2,8 ha/UBT (2100 kg = besoin de nourriture pour niveau de production souhaité).

Tout comme il est possible de calculer l'occupation maximum pour un pâturage donné et un niveau de production souhaité, il est possible d'indiquer le niveau de production maximum pour une occupation donnée. On peut ainsi vérifier si des facteurs autres que l'alimentation déterminent la production de l'élevage (production animale plus faible que prévue), ou déterminer quelle adaptation de l'occupation est souhaitable. Un exemple illustrera mieux ce cas.

L'exemple porte sur 1 ha du Ranch : la disponibilité en fourrage est de 910 kg à partir de la strate herbacée et de 80 kg de fourrage des espèces ligneuses (II.4.5.2), dans le cas de l'élevage bovin. Les calculs d'ingestion et de modification de poids par rapport à la densité du bétail ont été réalisés pour un animal moyen, compte tenu de la qualité des pâturages naturels (tableau I.24, situations fourragères I et II) : cet animal de base présente 150 kg de poids vif au début de la saison des pluies ; la conversion en UBT s'est effectuée sur la base de la moyenne pondérée du poids vif, partant de 165 kg par animal sans sélection, jusqu'à presque 190 kg par animal pour une sélection maximum. La période des pluies dure 3 mois et la saison sèche 9 mois.

Pendant la saison sèche, la moyenne du taux d'azote est de 5,9 g/kg. Une extrapolation à partir de la figure II.23, fait apparaître qu'une fraction de 0,95 du fourrage comporte un taux d'azote d'en moyenne 6 g/kg. Il ressort également de la figure qu'une fraction de 0,73 du fourrage présente un taux d'azote moyen de 7 g/kg et qu'une fraction de 0,59 répond même à la norme de 8 g/kg.

Si la quantité totale de 990 kg/ha est consommée par une seule UBT, cela couvre 226 jours de pâturage. Pour la saison sèche, il faut alors 1,04 ha/UBT. Compte tenu du fait que le menu de ces animaux ne présente qu'un taux d'azote de 5,9 g/kg (donc ingestion de fourrage de moins de 4,4 kg/jour), il y aura perte de poids de 59 kg/UBT pendant la période de 9 mois.

Si, sur les 990 kg/ha, une fraction de 0,95 est consommée, les animaux peuvent sélectionner un menu avec un taux d'azote de 6 g/kg. Dans le cas d'une consommation de respectivement 0,73 et 0,59 du fourrage disponible, ceci représente 7 et 8 g/kg. Dans le cas de sélection d'un menu avec un taux d'azote de 6 g/kg, le fourrage suffit pour 180 jours de pâturage. Par UBT, il faut alors 1,4 ha de pâturage de saison sèche, et la perte de poids par UBT sera de 52 kg. Ainsi, lors d'une sélection d'un menu avec un taux d'azote de 7 g/kg, il faut 1,9 ha/UBT, alors que la perte se monte à 38 kg/UBT. Pour un menu avec un taux d'azote de 8 g/kg, ceci représente 2,3 ha et 8 kg par UBT. La perte de poids peut être entièrement évitée lorsque le bétail a la possibilité de sélectionner un menu avec un taux d'azote de 8,5 g/kg à partir d'un fourrage avec un taux d'azote moyen de 5,9 g/kg ; il faut alors 2,5 ha/UBT pour la saison sèche.

Le gain de poids pendant la saison des pluies est estimé à 42 kg/UBT, à condition que les taux d'azote du menu correspondent à ceux indiqués dans le tableau I.22, pour le sud du Sahel. La superficie nécessaire par UBT pour les 3 mois de la saison des pluies est estimée à 0,6 ha, sur la base d'une disponibilité en fourrage de 910 kg/ha pour la seule strate herbacée, et d'une ingestion de matière sèche de 5,6 kg/jour.

Le bilan peut ainsi être effectué pour une année entière (tableau II.34).

Tableau II.34
Production bovine en fonction de l'occupation des pâturages et influence de l'occupation sur le menu, pour une année à pluviosité moyenne au ranch de Niono (550 mm/an).

	occupation des pâturages (ha/UBT)		
	2,9	2,4	2,0
taux d'azote du menu (g/kg)	8	7	6
fraction nécessaire de fourrage (kg/kg)	0,68	0,79	0,96
modification de poids (kg/UBT) :			
saison des pluies	+55	+55	+55
saison sèche	-10	-49	-68
total (kg/UBT par an)	+45	+6	-13
total (kg/ha par an)	+16	+2	-8

La mesure dans laquelle la sélectivité a été prise en compte dans la méthode de calcul adoptée, se concrétise par des différences dans l'occupation du pâturage, et par des différences dans la production par animal et par ha. Une expérience de pâture a donc été simulée : la quantité de fourrage disponible par animal a été soumise à des variations, et les effets de ces variations sur la qualité du menu, et par conséquent sur la production escomptée, ont ensuite été analysés.

Les résultats sont représentés graphiquement dans la figure II.24, pour laquelle trois trajets différents ont été distingués du point de vue de l'occupation, exprimés ici en UBT/ha. L'hypothèse adoptée est qu'un menu avec un taux d'azote de 8,5 g/kg est le meilleur que les bovins puissent sélectionner pour un taux moyen de 5,9 g/kg. Ces résultats peuvent être interprétés comme suit :

Figure II.24
Production bovine en tant que fonction de l'occupation des pâturages (UBT/ha) ; résultats des calculs pour une année moyenne dans le sud du Sahel ; voir le texte pour les explications des trajets I, II et III.
o : kg/UBT par an ; x : kg/ha par an.

Trajet I :
Ce trajet se rapporte à une faible occupation des pâturages avec moins de 0,3 UBT/ha (> 3,0 ha/UBT). Dans cette situation, la production par animal est constante et dépend de la qualité de la meilleure fraction que les animaux peuvent sélectionner pendant la saison sèche. La quantité disponible ne joue pas encore de rôle : chaque animal peut disposer d'une part suffisante de cette fraction. Il en résulte que la production par ha augmente de façon linéaire avec l'occupation des pâturages.

Trajet II :
Cette situation d'occupation moyenne des pâturages, ne permet pas pendant la saison sèche de nourrir tous les animaux avec du fourrage de la meilleure qualité : le bétail est donc obligé de brouter de manière moins sélective. La production par animal baisse par conséquent très rapidement, à tel point que, malgré l'occupation croissante des pâturages, la production par hectare diminue.

Trajet III :
Dans cette situation d'occupation élevée des pâturages (plus de 0,5 UBT/ha, ou bien < 1,9 ha/UBT), les animaux se trouvent confrontés pendant la saison sèche à un manque absolu de fourrage.

Il faut souligner que dans le cas du trajet II, l'effet négatif sur la production par animal, engendré par une occupation accrue, est le résultat de la baisse de qualité du menu. Ce n'est qu'à partir d'une occupation au-delà de 0,5 UBT/ha que la disponibilité en fourrage totale par animal et donc l'ingestion, diminuent proportionnellement à l'accroissement du nombre d'animaux par ha. Comme le montre la figure II.24, la production par animal diminue encore plus vite que dans le trajet II.

La concordance entre la réalité et les calculs représentés dans le tableau II.33 et la figure II.24 dépend surtout de la capacité de sélection des bovins. Cette capacité constitue un facteur incertain. Les tendances qui se dessinent dans les résultats correspondent cependant avec les expériences faites lors des tests de pâture. Il est étonnant de constater que ce n'est pas seulement la production par animal, mais également celle par ha qui diminue, ce qui fait que les animaux ne peuvent plus utiliser de façon optimale leur capacité de sélection. Dans la pratique, la diminution de la production par animal et par hectare n'iront pas toujours de pair (voir par exemple Jones & Sandland, 1974). Des calculs identiques à ceux ci-dessus démontrent que la forme des courbes de la figure II.24 dépend de la qualité des différentes fractions de la biomasse totale. Il est clair cependant que l'utilisation de la sélectivité

naturelle d'un animal influence positivement non seulement la production par animal, mais également la production par ha. Une faible utilisation (c'est-à-dire une consommation modérée par kg de fourrage disponible) va dans ce cas donc de pair avec un rendement élevé de ce fourrage (une production élevée par kg de fourrage disponible). Ce résultat est confirmé par les résultats d'essais en étable avec des graminées et des légumineuses tropicales (Zemmelink, 1986). La qualité de leurs feuilles et de leurs tiges présente souvent de fortes différences.

L'occupation optimale des pâturages dans l'exemple est de 0,3 UBT/ha, parce qu'à ce stade, la production par animal et par ha sont tous deux à leur maximum. La consommation totale ne s'élève alors qu'à 60 % du fourrage disponible, soit 15 % de la production de la biomasse du Ranch. Pour une qualité moyenne plus faible, l'utilisation optimale se situera également à un plus faible niveau. Lorsque la qualité est plus élevée, l'utilisation optimale se déplace vers le haut. Le phénomène est le même dans le cas d'utilisation de suppléments : l'occupation optimale augmente lorsque l'utilisation augmente, jusqu'à ce que la disponibilité totale en fourrage devienne limitative pour la capacité de charge.

II.5.6.4. Exploitation durable des pâturages

Dans ce qui précède on ne s'est pas demandé si, à long terme, la production des pâturages est mise en péril par une intensité d'exploitation qui se situe en permanence au niveau des maxima calculés ci-dessus. En d'autres termes, la capacité de charge estimée sur la base de l'objectif de l'élevage est-il justifié du point de vue de l'environnement ? Les pâturages sont-ils en danger lorsque, comme dans l'exemple du calcul de la capacité de charge standard pour l'élevage bovin sur le Ranch, on utilise par année 730 kg sur les 4100 kg/ha de biomasse produite comme fourrage ?

La réponse à cette question n'est pas simple. Par contre, il est possible d'identifier les facteurs de la productivité des pâturages les plus sensibles pour l'exploitation, ainsi que les situations les plus critiques.

L'intensité de pâture exerce une grande influence sur les facteurs suivants, lesquels sont cités ci-après par ordre d'importance pour la région : sols sensibles à l'encroûtement, graminées pérennes et espèces ligneuses, disponibilité en graines et en phosphore sur les sols sablonneux.

Pour les sols les plus sensibles à l'encroûtement, la question n'est pas de savoir quelle partie de la production annuelle peut être exploitée sans danger. Ce qui importe, c'est quelle quantité de biomasse protectrice du sol est nécessaire au sens absolu, pour prévenir le compactage superficiel, la dégradation physique, et l'accroissement du ruissellement qui en découle. Il existe des indications selon lesquelles il s'agirait de 2500 kg/ha environ pour la strate herbacée quand la pluviosité est de $\geq$ 700 mm/an, de 2000 pour 500 mm/an et de 700 pour 250 mm/an (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 359). Cela vaut pour les sols (sablo-)limoneux, notamment lorsqu'ils sont situés sous une pente, à savoir les sols dominants de l'ensemble détritique. Ces quantités de biomasse correspondent environ à la production moyenne de la strate herbacée pour cette pluviosité, et il en résulte que ces sols ne peuvent pas ou à peine être utilisés comme pâturages lorsque cette exigence de durabilité est posée.

Bien que les graminées pérennes et les espèces ligneuses atteignent une production annuelle beaucoup plus élevée qu'une strate herbacée composée d'espèces annuelles, la biomasse exploitable est à peine plus élevée (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 286-288, 455-459). Il faut profiter de leur présence par l'intermédiaire du système d'exploitation, et non par une intensification de l'exploitation. Lorsque les espèces pérennes constituent une partie substantielle de la biomasse à la fin de la saison des pluies, il est recommandé de ne tenir compte que de la moitié de celle-ci, avant d'estimer d'abord les pertes, puis la fraction exploitable, suivant la méthode indiquée dans les deux paragraphes précédents. Dans le cas d'une exploitation continue des pâturages de longue date, il n'est pas nécessaire d'appliquer cette correction pour la biomasse exploitée pendant la saison des pluies. Dans le cas d'une exploitation continue d'espèces pérennes, l'effet de cette correction augmente à mesure que la saison des pluies raccourcit : pour la savane du sud (> 1200 mm), la savane du nord (600 à 1200 mm) et le Sahel (< 600 mm), il faut multiplier respectivement la production annuelle des espèces pérennes par 0,80, par 0,75 et par 0,65 ; dans le cas d'une exploitation pendant la saison sèche uniquement, il faut tout multiplier par 0,5. Cette correction est donc indépendante de celle relative aux pertes, et également de celle relative à la pâture (50 % de la biomasse pour le pâturage pendant la saison des pluies, 65 % pour un pâturage continu).

Pour les espèces ligneuses, on suggère de multiplier leur production annuelle par 0,15 afin d'estimer la quantité maximum exploitable.

La disponibilité limitée de P et l'apport négligeable de cet élément ont le plus de conséquences pour les sols sablonneux. En l'espace de quelques décennies, l'exploitation a déjà provoqué une redistribution mesurable de P : appauvrissement à distance des points d'abreuvement et enrichissement dans leur proximité (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 254, 255, 361 à 364 ; Tolsma, 1989).

En principe, ceci ne modifie pas la capacité de charge moyenne, à moins que les endroits enrichis par le phosphore se dénudent, ou soient recouverts par une végétation difficilement ou pas du tout consommable. Les points d'abreuvement naturels sont souvent entourés par des sols sensibles à l'encroûtement, qui se dénudent facilement. Dans la savane notamment, il peut également se produire de l'embroussaillement dans le cas d'une exploitation intensive continue des pâturages pendant la saison des pluies, ce qui influencera négativement l'exploitabilité (Tolsma, 1989). Notamment dans le nord du Sahel, il existe un risque de dénuement même pour les sols sablonneux, lorsque la densité du bétail autour des points d'abreuvement est telle que la végétation n'a aucune chance de s'installer lors du démarrage de la saison de croissance (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 360). Compte tenu de la production et des pertes de graines, cela signifie que la capacité de charge (locale) est inférieure à 3, à 2 et à 1 ha/UBT, pour une pluviosité de respectivement 100, 200 et 300 mm/an.

Lors d'un dépassement de la capacité de charge, il y aura dans le meilleur des cas, une évolution dans la composition floristique, vers des espèces non consommables, par exemple sous forme d'embroussaillement. Ce phénomène conduit finalement à une adaptation forcée de la densité du bétail. De manière plus générale, il se produit une diminution de la production et de la couverture végétale, par suite d'une diminution de la disponibilité en éléments nutritifs (notamment sur le sable) ou par suite d'un

compactage superficiel du sol et d'un ruissellement accru (sur les sols plus lourds). La diminution de la disponibilité des éléments nutritifs entraînera une diminution de la qualité du fourrage et également à la longue une diminution de la capacité de charge. Le ruissellement accru, par contre, entraîne une augmentation du taux d'éléments nutritifs de la végétation à production décroissante, et entraîne donc temporairement, de plus grandes possibilités d'exploitation. Le ruissellement augmente donc davantage et une dégradation complète de la végétation et du sol en est le résultat final (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 357-367).

Une évolution de la composition floristique dans le sens d'une dominance des espèces non appétibles, a le plus de chance de se réaliser là où le changement a le temps d'intervenir : ou bien la densité du bétail augmente très lentement, ou bien la biomasse et la production annuelle sont relativement élevées, ou encore le substrat est relativement stable. En d'autres termes, cette évolution se produira plus fréquemment dans le sud avec sa pluviosité relativement forte, que dans le nord, et plutôt sur le sable que sur les sols plus lourds.

Indépendamment de la question de savoir dans quel cas le surpâturage conduit à la dégradation de la végétation et du sol, et dans quel cas il conduit à des modifications dans la composition floristique entraînant une diminution de la quantité utilisable de fourrage, on peut indiquer les situations les plus critiques dans lesquelles il faut tenir compte, en premier lieu, des normes d'environnement suggérées. Ces situations peuvent être réparties en trois groupes, qui peuvent être caractérisées par les mots clef : systèmes, hétérogénéité et pertes.

Les systèmes d'élevage qui permettent la plus grande intensité d'exploitation présentent le plus de risques (II.5.6.3) :
- élevage agropastoral, pour lequel la force de traction et le fumier constituent les objectifs de production les plus importants ;
- systèmes intensifs pour lesquels la faible qualité du fourrage produit par les pâturages naturels est compensée par des concentrés ;
- la transhumance ;
- les systèmes qui utilisent des troupeaux mixtes et pour lesquels le rapport herbiphiles et ligniphiles est proportionnel à la disponibilité en fourrage en provenance de la strate herbacée et des espèces ligneuses.

Il faut être conscient que la transhumance peut, déjà localement, occasionner des dégradations avant que la production animale sur la totalité des pâturages exploités n'ait atteint le maximum par hectare. Le rapport des surfaces entre les différents pâturages exploités au cours de l'année ne concordera que rarement ou jamais entièrement au besoin vu l'importance du troupeau et la durée de présence. La figure II.24 s'applique à un pâturage à un endroit donné, et non à un complexe de pâturages à densités de bétail diverses et variables dans le temps et l'espace (Breman, 1975 ; Breman *et al* ., 1990).

L'hétérogénéité de la disponibilité en fourrage dans l'espace et dans le temps comporte également un risque, tout comme la transhumance. Deux autres exemples ont déjà été mentionnés, l'hétérogénéité causée par la présence de points d'abreuvement et l'hétérogénéité produite par la sécheresse. La pâture à

partir d'un point fixe, tel un point d'abreuvement, situé ou non à proximité d'un village, occasionne en soi une hétérogénéité dans la disponibilité en fourrage. Cette hétérogénéité est due au transport d'éléments nutritifs et au gradient en densité de bétail avec la distance jusqu'au point d'abreuvement. Supposons qu'un village soit situé au flanc sud du Sahel, avec des pâturages identiques à ceux du ranch de Niono, et avec une capacité de charge standard pour les bovins de 2,8 ha/UBT. Lorsqu'il y a suffisamment d'eau potable au village, et que le déplacement maximum du troupeau s'étend à 6 km du point d'abreuvement, un troupeau de 4035 UBT peut être maintenu sur un total de 11.300 ha. Mais lorsque ce troupeau est présent près du village de 18.00 à 6.00 heures et qu'il peut s'y promener librement, la densité de bétail est supérieure à 0,1 ha/UBT, à condition que le bétail ne s'éloigne pas au-delà de 1 km du point d'abreuvement. La mise à l'étable du bétail peut éviter cette densité extrême, et c'est d'ailleurs ce qui se passe le plus fréquemment avec le bétail sédentaire. L'objectif recherché est alors le plus souvent la production de fumier en faveur de l'agriculture, ce qui fait que l'appauvrissement du pâturage loin du village n'est plus du tout compensé par l'ingestion autour du village, d'une nourriture relativement riche.

Tout comme les années sèches influencent négativement la norme de la capacité de charge liée aux objectifs de production animale, il en va de même pour la capacité de charge liée à la sensibilité du milieu. Les risques augmentent donc vers le nord, au fur et à mesure de la variabilité de la pluviosité.

Une dernière situation relative à l'hétérogénéité est celle de la différence en appétibilité entre les espèces, ce qui, notamment pour les espèces ligneuses, peut avoir de grandes conséquences, surtout dans le cas de chèvres et de dromadaires. Selon le calcul de la capacité de charge standard pour les bovins, seule une fraction de 0,2 × 0,3 × 0,3 = 0,02 de la production totale de pâturage aérien est utilisée (20 % appétible ; 30 % disponible pendant la saison sèche ; 25 à 35 % accessible du point de vue hauteur). L'intensité d'exploitation reste ainsi loin en-dessous du critère d'environnement mentionné précédemment de « 15 % exploitable ». Mais lorsqu'une population d'espèces ligneuses dans une unité donnée se compose entièrement d'espèces appétibles (F46a, voir II.4.5.2), une fraction de 10 % est déjà exploitable, et si les bergers aident le bétail en coupant des branches avec feuilles, une fraction de 30 % sera atteinte. Le rajeunissement des peuplements des espèces ligneuses augmente aussi l'accessibilité : une espèce comme *Pterocarpus lucens* n'est pas seulement recherchée par le bétail, elle constitue également un bon bois de chauffe. La pression d'exploitation sur certaines espèces peut donc être beaucoup plus élevée que ne le laisse supposer la densité du bétail. C'est pourquoi ce manuel conseille de déterminer la contribution des espèces individuelles à la production des pâturages aériens (II.3.5.4). En utilisant les informations de la partie IV (II.3), si nécessaire et si possible complétées avec des observations propres (II.4), la disponibilité en fourrage des espèces ligneuses peut être définie avec plus de précision.

Le troisième groupe de situations à risque est celui ou d'autres pertes importantes interviennent à côté des pertes de pâture. La cause principale en sont les feux. Le risque pour l'environnement est le plus grand lorsqu'une strate herbacée composée d'espèces annuelles risque de brûler. Localement des fléaux (insectes) ou des grands herbivores sauvages peuvent occasionner une plus grande charge sur la végétation que la simple densité du bétail. Ce troisième groupe n'exerce en principe pas d'influence sur la capacité de charge estimée suivant la méthode de ce manuel, car les pertes moyennes par les feux et

les herbivores ont déjà été pris en compte dans le facteur f de l'équation N_b (III.2.2.1).

Accorder de l'attention aux aspects de l'environnement lors de l'estimation de la capacité de charge signifie donc :
- prendre pour base de l'évaluation de la capacité de charge, la situation fourragère pendant une année sèche dans le Sahel proprement dit ;
- pour les espèces pérennes, ne considérer que la moitié de la biomasse à la fin de la saison de croissance pour le calcul ; pour le pâturage aérien ne considérer que 15 % de la production annuelle des espèces appétées ;
- pour la transhumance c'est le chaînon le plus faible du cycle annuel qui est déterminant, il doit être identifié et quantifié.

Dans les autres cas, il est plus utile de tenir compte de l'environnement par le biais du système d'exploitation, que par l'intensité d'exploitation :
- les feux ne doivent être acceptés qu'en tant qu'instrument de gestion choisi sciemment ;
- la libre circulation du bétail autour du village ou des puits doit être évitée ;
- pendant la saison des pluies, la pâture de sols extrêmement sensibles à l'encroûtement est à déconseiller ; le maintien (ou la régénération) des graminées pérennes sur de tels sols exige une grande attention ;
- la mise en étable du bétail et l'utilisation intensive du fumier sur les champs demande la prise en considération du statut de P des pâturages et du bétail.

Partie III
Partie IV, bibliographie et annexes

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens (Partie III)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

Table des matières
Partie I
Partie II.1 et II.2
Partie II.3
Partie II.4 et II.5

Partie III

III. Justification scientifique

III.1. Objet, objectif et contenu

La partie III fournit la justification scientifique des méthodes et concepts utilisés dans le manuel proprement dit (partie II), pour autant que celle-ci n'ait pas été publiée ailleurs, de manière accessible, par les auteurs ou leurs anciens collègues du projet Production Primaire au Sahel (PPS ; Breman & Uithol, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982). Il s'agit de méthodes et de concepts appliqués dans II, ou d'éléments de ceux-ci, pour lesquels des alternatives toutes faites n'ont pu être trouvées (ou pas dans les temps voulus) chez des tiers.
L'objectif de cette justification est :
- de mieux faire comprendre les méthodes utilisées et d'en favoriser ainsi une utilisation plus minutieuse ;
- de permettre une adaptation des méthodes à des situations non traitées, par exemple par l'ajustement des paramètres ;
- de promouvoir l'efficacité de la recherche d'appui en indiquant les incertitudes et les limites des connaissances actuelles.

La partie III s'adresse principalement aux chercheurs et techniciens expérimentés disposant des connaissances théoriques requises. Ces derniers seront certainement intéressés par les parties allant au-delà de la simple justification, car ces chapitres présentent des méthodes complètes, jugées trop complexes pour figurer dans la partie II. Ces méthodes concernent des estimations du ruissellement pour une intensité pluviométrique s'écartant de la moyenne (III.2.3), des estimations de l'ingestion de nourriture par rapport à la qualité du fourrage (III.3.3) et des estimations des paramètres de production

animale par rapport à l'ingestion et à la qualité du fourrage (III.3.3-5).

Les sujets traités ont été divisés en trois domaines : production végétale, production animale et capacité de charge. Le premier groupe accorde également une attention toute particulière à la disponibilité en eau, puisqu'il s'agit là d'un des facteurs déterminant la production végétale.

Au cours du projet PPS (Penning de Vries & Djitèye, 1982), peu d'attention a pu être accordée aux règles régissant la production dans le nord du Sahel, région à production (partiellement) limitée par la disponibilité en eau. C'est pourquoi la méthode d'évaluation pour les pâturages caractérisés par une production limitée par la disponibilité en eau, repose principalement sur des considérations théoriques (III.2.2.1). La croissance limitée par la disponibilité en éléments nutritifs dans les zones sahélienne et soudanaise était au centre du projet PPS. Bien que les publications en la matière soient nombreuses, un paragraphe (III.2.2.2) lui a été consacré compte tenu de la place centrale qu'occupent dans ce manuel les processus qui s'y rapportent.

La connaissance de la disponibilité absolue et relative de l'eau et des éléments nutritifs est d'importance cruciale pour l'estimation de la production et de la qualité des pâturages. La disponibilité en eau notamment, varie considérablement, entraînant d'importantes conséquences pour la disponibilité en éléments nutritifs. C'est pourquoi des méthodes ont été développées pour quantifier l'influence des différences de répartition et intensité des pluies sur les pertes d'eau par évaporation, ruissellement et percolation (III.2.3 et III.2.4).

Le fait d'inclure la percolation dans les considérations, a permis d'agrandir la valeur utilitaire des connaissances acquises dans le projet PPS pour la zone de la savane. L'application pratique de ce manuel à la savane, exigeait en outre des connaissances relatives aux concordances et divergences entre la croissance des espèces annuelles, pérennes et ligneuses ainsi qu'à leurs influences réciproques (III.2.6 ; III.4.2 et III.4.4.3).

Le taux d'azote de la biomasse végétale joue un rôle important dans la détermination de la production végétale. Le chapitre consacré à la production animale décrit tout d'abord comment utiliser cette production pour caractériser la qualité du fourrage (III.3.1). L'ingestion de fourrage est déduite de la qualité du fourrage et des besoins des bovins (III.3.2) ; ceci est suivi par la méthode permettant de déterminer les paramètres de production des animaux individuels et des troupeaux (III.3.3-6).

Le concept de capacité de charge est présenté en dernier, avec trois points principaux : l'occupation maximale des pâturages sous réserve du maintien du troupeau, l'occupation souhaitable compte tenu des objectifs de production animale et, la réduction éventuelle de cette occupation pour répondre aux exigences de durabilité.

III.2. La production végétale

III.2.1. Introduction

Comme nous l'avons déjà vu, la production primaire est tributaire des caractéristiques des végétaux et du sol sur lequel ils se développent, ainsi que des facteurs environnants tels que le climat. Les interactions entre ces différents facteurs sont très complexes, et il est souvent difficile d'en prévoir toutes les conséquences. Afin d'exploiter pleinement et efficacement les connaissances disponibles, il peut s'avérer utile d'avoir recours aux modèles mathématiques, qui décrivent quantitativement les processus importants ; les résultats pouvant être obtenus à l'aide d'ordinateurs (de Wit, 1970). Il s'agira de modèles dynamiques, dans la mesure où les descriptions portent sur des modifications intervenant dans le temps.

Un tel modèle de simulation est utilisé (III.2.2.1) pour l'évaluation théorique de la production végétale, dans les cas où l'eau constitue le facteur de croissance principal. La journée constitue l'unité de temps utilisée dans les calculs ; ce choix repose sur la disponibilité des données, la précision requise et la constante de temps du système.

Dans les cas d'infiltration annuelle moyenne plus élevée (soit plus de 250 mm pour les pays du Sahel), entraînant une disponibilité en eau plus importante pour la végétation, la production est déterminée non plus par la disponibilité en eau, mais par celle en éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore. Dans ces conditions, il faudra quantifier les éléments nutritifs disponibles pour la végétation, en plus de la disponibilité en eau, pour estimer la production. Les processus déterminants, dont la plupart sont des processus microbiologiques, sont cependant quantitativement beaucoup moins connus que ceux du bilan hydrique. Il est par conséquent plus difficile de développer des modèles dynamiques pour les bilans des éléments nutritifs, bien que des tentatives sérieuses soient effectuées en ce sens (cf. van Keulen & Seligman, 1987). Dans ce manuel, le choix porte sur une méthode de calcul qui présente un caractère plus statique, en contournant la complexité du bilan d'azote. Dans la mesure où l'azote constitue, dans la plupart des cas, le facteur le plus limitatif, les considérations de III.2.2.2 sont illustrées par cet élément, la base ayant été fournie par les travaux de Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 226-246 et 275-281).

Les estimations des productions ainsi obtenues, qu'il s'agisse des situations où la disponibilité en eau constitue le facteur déterminant, ou de cas où la disponibilité en éléments nutritifs prédomine, sont basées sur les valeurs moyennes des données variables déterminantes telles que le climat, les propriétés du sol, etc. La variabilité des éléments, climat, propriétés du sol, et utilisation des pâturages, étant très importante, une telle situation « moyenne » se produira rarement. C'est pourquoi, ce manuel traite des méthodes à utiliser pour décrire et quantifier les situations divergentes de la situation « moyenne ». Ces méthodes, ainsi que les hypothèses qui en découlent, sont explicitées dans III.2.3.

III.2.4 traite d'une méthode d'évaluation du coefficient de ruissellement qui repose sur une analyse des données pluviométriques de sols de caractéristiques diverses. Ce chapitre traite également de la capacité de stockage en eau d'un versant. III.2.5 présente brièvement comment a été établie l'estimation du taux d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance.

Un problème spécifique de la méthode d'estimation est constitué par la quantification de la production

des espèces ligneuses, et l'influence qu'exerce ce composant du système, sur la production de la strate herbacée. Les modèles dynamiques décrivant la production des espèces ligneuses, sont à ce jour encore peu développés et testés (Mohren, 1987). Dans ce manuel, les estimations de production sont basées sur des relations empiriques déduites des données en provenance des ouvrages spécialisés et des observations sur le terrain. III.2.6 traite de la théorie de la concurrence entre les espèces ligneuses et la strate herbacée, et de la méthode de correction qui permet d'évaluer dans la pratique la production de la strate herbacée en présence des espèces ligneuse.

III.2.2. Estimation théorique de la production de la strate herbacée

III.2.2.1. Production déterminée par la disponibilité en eau

Description du modèle

Le bilan en eau
Les estimations de la production devant être effectuées dans les situations où l'eau constitue le facteur de croissance principal, la quantité d'eau disponible pour la végétation doit être connue à tout moment. C'est la raison pour laquelle tous les processus d'entrée et de sortie d'eau sont décrits quantitativement.

Pour ce type de calculs, il s'agit, non seulement de subdiviser le temps en intervalles isolés, mais également l'espace qui, dans ce cas précis, est représenté par le sol (de Wit & van Keulen, 1972). Aussi, la profondeur totale du sol faisant l'objet de l'examen, sera subdivisée en couches. Dans le cas présent, la profondeur totale entrant en ligne de compte est de 3 m, subdivisée depuis le haut, en 10 couches de 0,05 m, en 5 de 0,1 m, et en 8 de 0,25 m. Les couches situées dans la partie supérieure du profil sont moins épaisses, car c'est à ce niveau qu'apparaissent les gradients les plus extrêmes, ainsi que les plus grandes modifications. Il est cependant très aisé d'adapter, si nécessaire, la profondeur totale du profil, ainsi que le nombre de couches et leur épaisseur, dans le cas de besoin. III.2.3 traite d'un tel exemple : la profondeur du sol y est variée afin de quantifier la percolation hors du profil.

Individuellement, chaque couche est considérée comme homogène, mais toutes les couches n'ont pas nécessairement les mêmes caractéristiques ; ceci permet la description de sols multi-couches. Pour cela, il faut que soit donné pour chaque strate, la profondeur en dessous de la surface du sol, ainsi que ses capacités de stockage en eau. Dans ce modèle, ces dernières caractéristiques sont définies par le taux d'humidité volumétrique à la capacité au champ, au point de flétrissement et d'un sol séché à l'air. Ces valeurs n'ont pas de définition physique précise, car elles dépendent non seulement des caractéristiques du sol, mais également des conditions régnant aux limites du système, telle que la profondeur de la nappe phréatique. En outre, elles peuvent varier en fonction de l'espèce végétale. Cependant, quand il s'agit de décrire la quantité d'eau disponible pour les végétaux, cette formulation semble satisfaisante (van Keulen, 1975).

Pour le taux d'humidité à la capacité au champ, on prend généralement la valeur pour un potentiel d'humidité de 1/3 bar, ou pF 2,5 (Hillel, 1971 ; Slatyer, 1968). Diverses conceptions existent pour les

sols des pays sahéliens (Dancette, 1973, 1970 ; Charreau, 1961). Elles proviennent probablement des différences de texture du sol, et de la définition un peu vague de la capacité au champ. La teneur en humidité, phase où la redistribution de l'eau est « pratiquement » terminée (Veihmeier & Hendrickson, 1949), peut être déterminée aussi bien par les conditions limites à la base du profil - apparition d'une «situation d'équilibre » - que par la faible conductivité hydraulique du sol. L'absence ou la faible influence d'une nappe phréatique très profonde, pourrait résulter, dans cette situation d'équilibre, en une teneur en humidité correspondant à pF 3 dans la partie du profil pénétrée par les racines. D'autre part, la conductivité hydraulique des sols à texture un peu plus grossière est tellement basse, que le transport d'eau s'arrête effectivement aux alentours de pF 2. Dans le cadre du manuel le taux d'humidité à la capacité au champ est définie comme l'état d'humidité à une valeur pF de 2,5. Il est cependant conseillé de vérifier s'il existe des données expérimentales afin d'obtenir des évaluations plus fiables.

Les avis sont moins partagés sur la teneur en humidité au point de flétrissement ; il se situe généralement à pF 4,2, correspondant à un potentiel d'humidité de -15.000 cm (= -1500 kPa). Des différences ont été constatées entre les diverses espèces de plantes, mais les quantités d'eau utilisées par les plantes dans de telles situations de sécheresse, sont si faibles, que des petites différences dans la teneur en humidité au point de flétrissement n'influencent pratiquement pas la production. Les choses se présentent différemment quant il s'agit de la survie pendant les périodes de sécheresse, mais les connaissances en matière de physiologie de survie sont si limitées, que l'on ne peut s'y référer pour l'objectif présent. Dans le prochain paragraphe, ces problèmes sont traités plus en détail.

Le taux d'humidité d'un sol séché à l'air, situation qui résulte d'une exposition de longue durée au pouvoir séchant de l'atmosphère, est fixée à un tiers du taux d'humidité au point de flétrissement (van Keulen & Seligman, 1987).

Dans le présent modèle, les données mesurées de la pluviosité sont introduites. On utilise de préférence les chiffres journaliers de pluviosité, mesurés à proximité ou sur le lieu même. Lorsqu'on ne dispose pas de données locales, il est possible d'utiliser des pluviomètres enregistreurs situés à distance, en ayant soin de corriger les données au moyen d'estimations pertinentes, ou en utilisant une procédure plus formelle. L'utilisation d'observations de stations à distance comporte toujours un danger dû à la grande hétérogénéité géographique des précipitations qui peuvent varier de manière importante sur des distances de quelques kilomètres (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 37-52 . Il n'existe pas encore de solution satisfaisante à ce problème (voir également III.2.3).

La totalité de la pluie mesurée par le pluviomètre ne s'infiltre pas dans le sol. Une partie est captée par la végétation et s'évapore directement à partir du feuillage. Il est difficile d'évaluer l'effet quantitatif de cette interception sur le bilan total en eau du sol. Il est vrai que l'eau interceptée ne fournit pas de contribution aux réserves d'eau dans le sol mais, par ailleurs, il faut noter que, pendant l'évaporation de l'eau à partir des feuilles, les stomates sont entièrement ou partiellement fermées, et que la vitesse de transpiration est donc réduite. Il est ainsi question d'une compensation partielle. Rijtema (1965) suggère que la quantité d'eau captée est proportionnelle à la biomasse existante, mais selon Penman (1963), le captage est minime. Dans le présent modèle de simulation, il est admis que lors de chaque pluie, 1 mm

d'eau est capté par la végétation, et ceci indépendamment de la quantité de pluie, de l'intensité de la pluie ou de l'état de la végétation.

L'eau qui atteint la superficie de sol ne s'infiltre pas, elle non plus, dans sa totalité ; elle ruisselle en surface, lorsque l'intensité de la précipitation au niveau de la surface du sol est supérieure à la capacité d'infiltration du sol. Dans ce cas, des flaques se forment d'abord, mais lorsque la capacité de stockage de la surface du sol est dépassée, l'eau s'écoule. Ce phénomène se produit d'autant plus vite que la pente du sol est grande. Le taux de ruissellement est donc tributaire de la capacité d'infiltration du sol, de l'intensité des précipitations, et de la déclivité du terrain.

Un certain nombre de problèmes apparaissent lorsqu'il s'agit de quantifier ce processus. Tout d'abord, l'intensité des précipitations varie fortement d'un endroit à l'autre, d'une pluie à l'autre, et même à l'intérieur d'une même pluie, et les données concernant la répartition de l'intensité des précipitations sont très rares. Par ailleurs, la capacité d'infiltration du sol n'est pas constante, elle varie entre autres sous l'influence des précipitations et du labour du sol (Hoogmoed & Stroosnijder, 1984 ; Stroosnijder & Hoogmoed, 1984).

Des tentatives ont été faites pour quantifier le ruissellement de surface, sur la base d'une description précise de la topographie, des caractéristiques physiques du sol et des effets des précipitations sur ces caractéristiques (Casenave & Valentin, 1990 ; Rietveld, 1978 ; Hillel, 1977 ; Seginer & Morin, 1970). Les modèles de simulation qui ont été conçus dans ce sens, exigent cependant des données de départ très détaillées, telles que l'enregistrement continu des précipitations, les données précises sur la physique du sol, et ces informations sont rarement disponibles. Par ailleurs, les constantes de temps, relatives aux processus qui concernent l'infiltration dans le sol, sont très réduites, et pour obtenir une bonne simulation, les unités de temps nécessaires doivent être de l'ordre de la minute (de Wit & van Keulen, 1972). Il est donc pratiquement impossible d'insérer de telles descriptions dans des modèles simulant la croissance de la végétation et traitant des périodes de plus de 100 jours. C'est pourquoi, dans le présent modèle, la description employée est basée sur un coefficient de ruissellement moyen, déterminé par l'expérience, qui sera par la suite corrigé en fonction de l'importance des précipitations d'une journée déterminée. Le coefficient moyen de ruissellement est basé sur les résultats de mesure obtenus sur le site concerné, sinon il doit être estimé sur la base des connaissances de la région et des caractéristiques des sols qu'on y rencontre. Le rapport entre l'intensité des précipitations et le ruissellement, peut être déduit, ou bien à partir des modèles précités (lorsque des données détaillées sont disponibles en nombre suffisant), ou estimé par analogie, et dans ce cas il faudra tenir compte de la texture du sol (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-165). La description appliquée suppose implicitement une répartition identique des précipitations tous les jours de pluie, ce qui implique une nouvelle simplification du système.

Le fait que la répartition des précipitations varie sur une journée entière, et que l'unité de temps du modèle de simulation soit une journée, exige une nouvelle adaptation. Des observations ont montré que, lorsque la pluie tombe en début de journée, l'évaporation du sol correspond à l'évaporation potentielle de ce même jour. Une partie des précipitations aura donc disparu à la fin de la journée, surtout dans le cas

d'un sol nu (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-165). Lorsque la pluie tombe à la fin de la journée, une redistribution de l'eau peut intervenir pendant la nuit, ce qui permet à une partie de l'eau d'être transportée vers des couches plus profondes, où elle est mieux protégée contre l'évaporation. Dans le présent modèle, « l'infiltration r éelle » est calculée comme suit : avant que l'eau ne s'infiltre, on en déduit la différence entre l'évaporation potentielle du sol, et l'évaporation calculée sur la base de la teneur en humidité de la couche superficielle du sol. Dans cette hypothèse, on admet implicitement que la pluie tombe toujours en début de journée. Il en résulte que l'évaporation du sol risque d'être un peu surestimée, mais compte tenu de l'ordre de grandeur adopté, une description plus précise n'est pas nécessaire.

La quantité totale d'eau qui s'infiltre est répartie entre les différents compartiments du sol, selon le principe du « tipping bucket » : le taux d'humidité des compartiments est complété par le haut, jusqu'à ce qu'il atteigne le taux d'humidité à la capacité au champ. Ce processus intervient jusqu'à répartition totale de l'eau, ou jusqu'au moment où le taux d'humidité de tout le profil atteigne le taux d'humidité à la capacité au champ, après quoi, le surplus s'évacue hors du profil par le bas (percolation). Cette description suppose donc un équilibre instantané (c'est-à-dire dans l'intervalle de temps utilisé dans le modèle, soit un jour) de l'eau infiltrée, alors que l'effet de la répartition (partielle) n'est pas pris en ligne de compte. Une comparaison entre les résultats obtenus par cette description, et les résultats fournis par un modèle détaillé pour l'écoulement de l'eau selon les lois de la physique, a montré que la présente analyse donne une bonne estimation de la disponibilité de l'eau pour la végétation. La répartition de l'eau dans le profil n'est cependant pas décrite en détail (van Keulen, 1975). Il est possible de tenir compte partiellement de l'effet de redistribution, en prenant une valeur un peu plus faible pour le taux d'humidité à l'équilibre que celui à la capacité au champ, de manière à ce que, comme dans l'exemple choisi, l'eau s'infiltre un peu plus profondément dans le sol. Ceci reste cependant également arbitraire, tout comme on l'a souligné lors de l'analyse de la définition de la valeur de la capacité au champ.

En plus du ruissellement en surface, l'évaporation d'eau sur la surface du sol constitue l'une des causes principales de pertes en eau utile dans des conditions (semi-)arides (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-165 ; van Keulen et al., 1981 ; van Keulen, 1975). Une description exacte du bilan de l'eau exige donc une description minutieuse de ce processus. Tout comme pour l'infiltration, il n'est pas possible d'inclure dans un modèle de simulation comportant une unité de temps d'un jour, des descriptions basées sur les processus physiques concernés (van Keulen, 1975). C'est pourquoi le choix s'est porté sur un modèle descriptif, dont les paramètres peuvent être estimés à l'aide d'un modèle physique détaillé (Stroosnijder, 1982 ; van Keulen, 1975).

L'évaporation potentielle du système « sol-végetation » est introduite dans le modèle de simulation comme une « forcing function » (de Wit & Goudriaan, 1978), les valeurs en étant obtenues au moyen d'une approche « à la Penman » qui utilise la méthode des combinaisons (Penman, 1956 ; 1948). Lorsque les données climatiques déterminantes sont disponibles, ce calcul peut être introduit directement dans le modèle. Cependant, la précision des estimations ne s'en trouvera pas fortement augmentée, car la variation saisonnière en évapotranspiration potentielle est à peu près égale chaque année.

La contribution potentielle du sol à la perte totale en eau du système sol-végétation, est ensuite calculée par déduction de l'transpiration potentielle de la végétation. Lorsque la végétation forme une couche dense, toute l'énergie disponible sera utilisée pour la transpiration des végétaux, et la perte en eau par la surface du sol sera négligeable. Dans la plupart des cas, cette situation ne se produit pas, et l'évaporation du sol reste pendant toute la période de croissance un élément important du bilan de l'eau.

Après avoir déterminé la contribution potentielle du sol, l'examen se portera sur l'incidence de l'assèchement de la couche supérieure du sol. Le principe de départ est le suivant : l'humidification du sol est suivie d'une période pendant laquelle la vitesse d'évaporation est déterminée par des circonstances externes (« constant-rate state ») ; cette phase est suivie d'une période pendant laquelle la vitesse d'apport d'eau vers la surface d'évaporation constitue le facteur déterminant (« falling-rate stage » ; Hillel, 1968). Au cours de la première phase, la vitesse d'évaporation du sol est identique à la valeur potentielle. La longueur de cette phase varie et dépend des propriétés du sol, de la vitesse d'évaporation potentielle et du taux d'humidité du sol. Pour les pays du Sahel, les valeurs de la première phase se situent entre 1 et 3 jours. Pour la seconde phase, un rapport linéaire entre l'évaporation cumulative du sol, et la racine carrée du temps écoulé depuis le début de cette phase, apparaît satisfaisante (de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-165 ; Ritchie, 1972). La pente de ce rapport linéaire constitue une caractéristique du sol qui doit être déterminée expérimentalement. Dans le modèle, la vitesse momentanée de l'évaporation du sol est calculée à partir du rapport « évaporation du sol - eacine carrée du temps » , et le temps écoulé depuis le début de la phase « falling-rate ».

Dans le modèle, les mouvements d'eau entre les compartiments du sol n'existent qu'en présence de précipitations. Les déplacements sous l'influence du développement de gradients de potentiel ne sont pas décrits. Il en résulte que, lors de l'évaporation à la surface du sol, une redistribution de l'eau par l'intermédiaire d'un apport à partir de couches plus profondes, ne peut être simulé. Dans la pratique, il s'agit cependant là d'un processus important qui influence notamment la répartition de l'eau dans le sol. Dans le modèle, ce processus est décrit selon une méthode développée par van Keulen (1975). Cette méthode décrit le prélèvement par voie d'évaporation de l'eau dans les divers compartiments par une diminution exponentielle de la vitesse de prélèvement, en fonction de la profondeur, tout en tenant compte de la répartition momentanée de l'humidité dans le profil. Le « coefficient d'extinction (disparition » utilisé dans cette description constitue une caractéristique du sol, et peut être déterminé à partir de données expérimentales, ou à l'aide d'un modèle détaillé conçu pour l'évaporation du sol (van Keulen, 1975).

L'évaporation potentielle due à la végétation, est obtenue à partir de l'évaporation potentielle de l'ensemble du système « sol-végétation » , avec prise en considération du degré de recouvrement du sol. Il est alors admis que la vitesse potentielle d'évaporation due à la végétation augmente proportionnellement à l'interception de la lumière.

L'interception de la lumière est calculée à partir de la surface foliaire verte, en tenant compte de l'extinction exponentielle (Goudriaan, 1977). La valeur du coefficient d'extinction dépend du type de végétation ; elle varie de manière caractéristique entre 0,45 pour une végétation herbacée dressée, et 0,7

pour une végétation de feuilles principalement horizontales (par exemple des dicotylédones). Pour une végétation mixte naturelle dans les pays du Sahel, on adopte une valeur de 0,6.

La vitesse d'évaporation due à la végétation est calculée sur la base de la valeur potentielle, en tenant compte de la répartition des racines, de l'activité de celles-ci, et de la disponibilité en eau et de sa répartition dans le profil du sol. Il est généralement admis (de Willigen & van Noordwijk, 1987) que la densité des racines diminue de façon linéaire depuis la surface du sol jusqu'à la limite inférieure de la zone racinaire. L'activité des racines est déterminée par l'effet combiné de la densité des racines et de la répartition de l'humidité dans le sol. Il est admis que l'activité du système racinaire diminue de façon linéaire, à mesure que diminue la teneur en humidité, en-deçà d'une certaine valeur limite. Dans le cas présent, cette valeur limite est fixée à 40 % de la capacité totale de stockage d'eau disponible pour les plantes (définie comme étant la différence entre les teneurs d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement). L'activité totale des racines est ensuite « normalisée » de telle manière que, lorsque la teneur en humidité de tous les compartiments du sol se situe au-dessus de la valeur limite, l'évaporation totale de la végétation est égale à la valeur potentielle, et le prélèvement dans les différents compartiments est proportionnel à la densité des racines dans chaque compartiment. Lorsque une partie du système racinaire se situe dans des compartiments d'un taux d'humidité en-deçà de la valeur limite, le prélèvement à partir de ces compartiments est limité par un facteur de réduction, dont la valeur représente une fonction du taux d'humidité dans le compartiment en question. Le rapport fonctionnel est basé sur l'approximation de Veihmeier (Veihmeier & Hendrickson, 1955), selon laquelle le prélèvement de l'eau par les racines est influencé négativement lorsque le taux d'humidité dans un compartiment descend en-dessous de 40 % de la quantité totale d'eau disponible pour la végétation.

Pour chaque compartiment, le prélèvement de l'eau est donc déterminé par le produit des facteurs suivants : évaporation potentielle de la végétation, activité des racines, et taux de réduction des faibles degrés d'humidité du sol. La somme du prélèvement de l'eau à partir des différents compartiments représente la transpiration de la végétation.

Le bilan hydrique de chaque compartiment est ainsi entièrement décrit, et la rapidité de modification de la quantité d'eau est enfin calculée comme suit : vitesse d'afflux, moins vitesse d'écoulement, moins prélèvement d'eau dû à l'évaporation du sol, moins prélèvement d'eau dû aux racines. La vitesse ainsi calculée est obtenue sur un délai d'une journée, ce qui détermine la quantité d'eau pour la journée suivante.

Croissance de la végétation

La végétation considérée dans le modèle, est constituée d'un mélange d'espèces annuelles qui grandissent chaque année à partir de semences. L'estimation de la biomasse initiale, en fin de germination, doit être calculée pour chaque endroit, sur la base des réserves de semences présentes dans le sol et de leurs caractéristiques de germination (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 99-111 ; Elberse & Breman, 1989 et 1990). Bien que les caractéristiques de germination des différentes espèces soient assez bien connues, l'évaluation de la biomasse après la germination reste délicate, notamment

parce qu'au cours de cette phase de croissance, l'hétérogénéité géographique du substrat exerce une influence prédominante sur la quantité et la composition de cette biomasse (Cissé, 1986). Le présent modèle est établi sur une biomasse moyenne initiale, dépendante de l'isohyète, et elle est estimée sur la base des réserves moyennes de semences disponibles (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 105).

Dans le modèle de simulation, la germination commence lorsque le taux d'humidité dans les 0,05 m supérieur du profil, correspondant ici au premier compartiment, est supérieur au point de flétrissement (Hadas & Stibbe, 1973). On suppose que les graines peuvent alors puiser l'eau pour l'imbibition. La germination est considérée comme achevée lorsque les semences ont séjourné dans de bonnes conditions de germination, pendant une période dépassant un temps extérieur aux paramètres du modèle de simulation. Le temps nécessaire à l'accomplissement de la germination constitue une caractéristique de l'espèce (Elberse & Breman, 1989 ; Cissé, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 98-133). Une valeur moyenne a été définie dans le présent modèle, mais dans des situations spécifiques, où la composition de la réserve de semences est mieux connue, cette valeur peut être remplacée par les valeurs spécifiques à l'espèce. Lorsque le processus de germination est interrompu à la suite du dessèchement de la couche superficielle du sol, les graines qui germent sont supposées mourir, et la germination reprendra après une nouvelle précipitation ; le stock de semences est supposé suffisamment grand pour permettre des poussées de germination successives. Aussi la biomasse initiale est supposée identique après chaque poussée.

Lors de l'achèvement de la germination, la biomasse aérienne et souterraine de la végétation est initialisée. La biomasse aérienne est pourvue de la valeur initiale, telle que décrite ci-dessus ; pour le système racinaire, on adopte une valeur identique à celle de la biomasse aérienne, partant de l'hypothèse qu'au cours de la germination, le système racinaire se développe parallèlement aux pousses (Penning de Vries et al., 1979).

Deux processus sont à distinguer après la germination : croissance de la végétation (c'est-à-dire augmentation du poids et du volume), et développement de la végétation, soit la succession des stades phénologiques, caractérisés par la succession et la vitesse de formation de différents organes de la plante. La première approche suppose que les deux processus sont indépendants, permettant un grand éventail de poids pour un même stade phénologique, par exemple la floraison.

L'ordre de formation des organes est une caractéristique spécifique de l'espèce et est pratiquement indépendant des circonstances extérieures. La vitesse à laquelle apparaissent les organes, définie comme la vitesse de développement phénologique, est fortement influencée par les facteurs de l'environnement, notamment la température et la durée du jour (Robertson, 1983 ; van Dobben, 1962). A des températures plus élevées, les processus de développement se déroulent plus rapidement, raccourcissant ainsi la durée de la période de croissance. Les espèces sensibles à la durée du jour, nécessitent une durée maximale ou minimale de lumière du jour pour l'induction de la floraison, ou plus précisément, elles nécessitent une certaine durée d'obscurité, et leur vitesse de développement dépendra donc peu de la température ambiante. La plupart des espèces relevant de la végétation naturelle des pays du Sahel, appartiennent à ce groupe (de Ridder, 1979). Certains modèles de simulation traitent quantitativement de l'effet de la

photopériodicité sur le développement phénologique (Reinink et al., 1986 ; Weir et al., 1984). Un modèle de simulation représentant une végétation composée d'un mélange d'espèces, ne permet pratiquement pas une description aussi détaillé. C'est pourquoi la description choisie comporte une estimation par site de la date supposée du mûrissement de la végétation ; cette estimation est basée sur la connaissance du moment de la germination effective, de la composition floristique et la longueur du cycle des espèces (Cissé, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 116-118). La durée de la période s'écoulant entre la date de la germination (prévue dans le modèle), et la date supposée de mûrissement, est définie comme étant la longueur du cycle, et le stade de développement à chaque instant représente alors une fraction de cette période déjà écoulée. Si la composition floristique est connue avec précision pour un endroit donné, le travail de de Ridder (1979) permet d'introduire dans le modèle une description plus quantitative.

Après la germination, la vitesse de croissance de la végétation dépend de la vitesse de réduction du CO_2 en glucides au cours du processus d'assimilation. Cette vitesse constitue une fonction de l'énergie disponible (intensité de rayonnement), du degré selon lequel celle-ci peut être intercepté, par la végétation (le degré de recouvrement ou index de surface foliaire), et des caractéristiques d'assimilation des feuilles prises individuellement. Ces dernières concernent par l'efficacité initiale d'utilisation de la lumière au point de compensation, et la vitesse maximale d'assimilation dans le cas de saturation de lumière. Dans le modèle, le rayonnement journalier total mesuré a été introduit comme « forcing function » . A l'aide de la surface foliaire simulée de la végétation, et des caractéristiques d'assimilation des feuilles prises individuellement, la vitesse d'assimilation journalière brute peut être calculée selon une méthode développée par Goudriaan (1986).

Les caractéristiques d'assimilation des feuilles prises séparément sont également déterminées par l'espèce. Pour les espèces à cycle d'assimilation C_3, la valeur typique pour la vitesse d'assimilation de saturation de la lumière est de 40 kg de CO_2 par heure par hectare de feuille, alors que pour les espèces à cycle C_4, il est de 70 kg/ha par heure (van Keulen, 1986). Ces valeurs sont valables pour des feuilles jeunes adultes de plantes qui ont grandi dans des conditions optimales de lumière, d'eau et d'éléments nutritifs (van Heemst, 1986). L'efficacité initiale de l'utilisation de la lumière est pratiquement identique pour les deux groupes, et se situe à une fixation de CO_2 de 0,5 kg/ha par heure pour chaque J/m² par seconde. Lorsque la végétation avance en âge, et notamment après la floraison, au moment du transfert des principaux composants (tels que les protéines, passant des feuilles vers les graines en cours de développement), la capacité d'assimilation s'amoindrit.

Cette régression semble étroitement liée à la teneur en protéines et en azote des feuilles (van Keulen & Seligman, 1987). Les processus du bilan d'azote de la végétation n'étant pas décrits dans le présent modèle de simulation, l'hypothèse adoptée est celle d'une régression linéaire de la vitesse maximale d'assimilation, avec un stade de développement s'amplifiant entre 1 (floraison) et 2 (maturité).

La vitesse journalière totale d'assimilation brute se calcule, à ce stade, en multipliant la valeur (obtenue à partir du taux de recouvrement de la végétation, des caractéristiques d'assimilation, et de l'intensité de

rayonnement) par le rapport entre la vitesse actuelle et potentielle de l'évaporation de la végétation (de Wit, 1958).

Lorsque la végétation ne peut puiser suffisamment d'eau pour compenser les pertes dues à la transpiration, il en résulte une fermeture (partielle ou momentanée) des stomates, ce qui limite la transpiration. Ceci entraîne par ailleurs une entrave à l'apport de CO_2 pour le processus d'assimilation.

Dans la mesure où le transfert de CO_2 dans le sens atmosphère - végétation, et le transport de H_2O dans le sens végétation - atmosphère, s'effectuent par la même voie et sont réglés par les mêmes lois physiques, la vitesse d'assimilation et la vitesse de transpiration de la végétation sont proportionnelles (van Keulen & van Laar, 1986 ; de Wit, 1958). Une réduction de transpiration par suite de manque d'eau, entraîne donc une réduction proportionnelle de la vitesse d'assimilation brute.

Tous les produits d'assimilation qui se combinent pendant la photosynthèse, ne sont pas effectivement disponibles pour l'augmentation du poids de matière sèche. Une partie est utilisée par le mécanisme respiratoire, afin de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement biologique de la végétation (Penning de Vries, 1974). Schématiquement, la respiration peut être subdivisée en deux processus importants : la respiration d'entretien qui fournit l'énergie pour le fonctionnement de la végétation existante, et la respiration de croissance qui est liée à la conversion des glucides formés pendant le processus d'assimilation en matière végétale de base. Lors de la respiration d'entretien, le rôle principal est assuré par la restructuration des protéines se décomposant sans cesse, et la récupération à contre-courant du gradient de concentration des ions qui s'écoulent (Penning de Vries, 1975). Le coût de la respiration d'entretien est, pour cette raison, proportionnel au taux d'azote de la matière et au taux des minéraux. Le niveau de précision du modèle de simulation ne justifie pas une description aussi détaillée. C'est pourquoi il est admis que la matière de la pousse et celle de la racine, sont de composition moyenne, et nécessitent chaque jour pour assurer leur entretien, une quantité de CH2O de respectivement 0,015 et 0,01 kg par kg de matière sèche.

La respiration de croissance est liée à la conversion des glucides et acides aminés (formés au cours du processus d'assimilation), en matière végétale de base telle que les protéines, les lipides et les glucides. Au cours de cette conversion, une partie des glucides est utilisée pour fournir de l'énergie permettant le transport par l'intermédiaire des membranes, alors que certains « fragments » sont libérés et disparaissent comme éléments non utilisables, sous la forme de CO_2 et de H_2O. Le coût de la respiration de croissance est fonction de la composition de la matière formée (Penning de Vries, 1974). Dans le présent modèle, le choix s'est porté sur une composition moyenne, et l'efficacité de conversion, c'est-à-dire un facteur correspondant à (1 - respiration de croissance), se situe à 0,7. Donc, chaque kg de produits primaires d'assimilation fournit 0,7 kg de matière végétale de base.

L'accroissement total en poids de matière sèche est réparti entre la pousse et le système racinaire en fonction du stade de développement de la végétation. Dans un premier stade, les produits d'assimilation sont utilisés en grande partie pour permettre le développement du système racinaire car, par la suite, ce seront ces racines qui permettront à la végétation de s'approvisionner au mieux en eau et en éléments

nutritifs. La formule de répartition est basée sur des observations de la végétation naturelle au Mali (de Ridder et al., 1982). Dans le présent modèle de simulation, la répartition entre la pousse et le système racinaire n'est pas influencée par l'état de la végétation. Il s'agit là d'une simplification de la réalité, car lorsque la végétation grandit dans des conditions non optimales de disponibilité en eau, la relation pousse/système racinaire est en général (mais pas toujours) moins élevé que dans le cas d'une végétation bien pourvue en eau (Kooman & Janssen, 1980 ; Lof, 1976). La réserve exprimée dans la phrase précédente situe déjà le point faible : la réaction de la plante par rapport à la distribution de matière sèche dans des conditions de croissance non optimales, est mal connue quantitativement et n'a par conséquent pas été prise en ligne de compte.

Comme on l'a déjà dit, en présence de manque d'eau, la végétation réagit par la fermeture des stomates afin de limiter, de cette façon, la perte d'eau vers l'atmosphère. Lorsque le manque d'eau se prolonge, la réaction suivante sera la perte de feuilles, pour limiter ainsi la surface d'évaporation ; si la sécheresse s'éternise, la végétation dépérit. Peu de choses sont connues d'une façon quantitative sur les processus qui jouent un rôle dans cette physiologie de la survie. C'est pourquoi, dans le modèle de simulation, aucun essai n'a été réalisé pour décrire de manière détaillée le processus de dépérissement par manque d'eau permanent. Dans le cas présent, le nombre de jours successifs a été enregistré, pour lesquels la sécheresse du sol est telle que la végétation ne peut puiser aucune eau. Dès que la valeur limite (déterminée à l'avance) est dépassée, la végétation est considérée comme morte. Cette valeur limite est assez arbitraire, mais il s'avère que les résultats du modèle ne sont pas très sensibles à une valeur exacte. Cela provient principalement du fait que, pendant les jours de manque d'eau, la croissance est déjà faible, sinon nulle. L'influence est la plus grande dans les situations où la végétation est raisonnablement développée, et où seul un élément temps décide entre la mort ou la survie, due à une éventuelle précipitation.

L'intégration des vitesses de croissance, calculées de cette manière, permet de tenir à jour le poids de matière sèche du système racinaire et de la pousse et permet de calculer la totalité de la biomasse souterraine et aérienne.

La surface verte de la végétation, intervenant activement dans le processus d'assimilation, est déterminée à partir de la totalité de la biomasse aérienne, au moyen d'une fonction qui lie l'index de surface foliaire au poids de matière sèche. Cette relation réunit (cf. Watson, 1947) les paramètres « leaf weight ratio » (la part feuille dans la biomasse aérienne totale), et « specific leaf area » (la surface de feuille par unité de poids de matière sèche, selon l'analyse classique de la croissance). Les données utilisées à cet effet ont également été déterminées de manière empirique, bien que le nombre d'observations ait été plutôt restreint.

Comme on l'a souligné dans l'introduction, ce modèle de simulation pour le calcul de la croissance et de la production, ne peut être uniquement utilisé dans des situations où l'eau constitue le facteur de croissance principal, et c'est pourquoi l'utilisation en est limitée à la zone où les infiltrations moyennes annuelles (*I*) sont inférieures à 250 mm.

Test du modèle de simulation

Un certain nombre d'expériences puisées dans les ouvrages spécialisés ont été évaluées à l'aide du modèle, afin de vérifier dans quelle mesure les résultats du modèle décrit ci-dessus correspondent à la réalité de la disponibilité en eau. Ces expériences se rapportaient à des situations où l'eau constituait le facteur de croissance principal, grâce à un apport des éléments nutritifs.

Migda, Israël
Pendant les années 1971-1975, des expériences ont été réalisées dans la partie septentrionale du Néguev en Israël, dans le cadre d'une large étude consacrée à « la production actuelle et potentielle des pâturages semi-arides » (van Keulen *et al.* , 1982 ; van Keulen, 1975). Il s'agit là d'une végétation naturelle, composée d'un mélange d'espèces annuelles C_3, dominées principalement par les graminées. Les propriétés physiques du sol, intégrées dans le modèle, ont été fournies par van Keulen (1975) ; la pluviosité a été mesurée aux endroits où ont été effectués les tests ; les autres données météorologiques proviennent d'une station du Service météorologique israélien, située à quelques kilomètres de là.

La saison de croissance 1971/1972 a bénéficié d'une situation favorable en matière de disponibilité en eau - total de 370 mm (comparé à une moyenne de 250 mm/an sur une longue période) - ainsi que d'une répartition avantageuse. Il y a concordance pendant la saison de croissance, entre les quantités d'eau mesurées et simulées, dans la couche du sol comprise entre 0 et 180 cm (figure III.1) Cette concordance est d'autant plus grande que la précision des mesures est inférieure à 10 %, même sur ces sols homogènes. Les mesures et les simulation de répartition d'humidité dans le profil concordent également (figure III.2). Pour la journée 109, le front d'humidification se situe à une profondeur de 90 cm, et ce, pour les mesures tout comme pour les simulations. Les taux d'humidité dans les couches situées en-dessous de ce niveau sont un peu supérieures à la simulation, ce qui résulte probablement d'une légère redistribution de l'eau, processus dont le modèle n'a pas tenu compte. Le modèle reproduit bien l'humidification après la journée 121, grâce à des pluies ininterrompues. Il semblerait qu'à cause de la pluviosité relativement élevée, le taux d'humidité puisse se situer temporairement au-delà de la capacité au champ (30 à 60 cm de profondeur pour la journée 133), ce qu'une fois encore le modèle ne décrit pas. Par contre, l'assèchement progressif du profil entre les journées 171 et 201 est à nouveau très bien décrit par le modèle.

Le modèle décrit également de façon satisfaisante la quantité totale d'eau dans le profil, ainsi que la répartition d'humidité de la saison 1972/73. Il s'agit d'une année moyenne avec une pluviosité totale de 245 mm et une répartition favorable.

En conclusion, on peut affirmer que, pour cette région méditerranéenne semi-aride à pluviosité hivernale, le modèle procure une description satisfaisante du bilan hydrique, et ce, aussi bien pour la réserve totale d'humidité que pour la distribution dans le profil.

Figure III.1
Réserve d'eau mesurée (o blanc) et simulée (o noir) dans le profil du sol (0-180 cm) au cours de la

saison des pluies 1971/72 à Migda (Israël).

Figure III.2

Taux d'humidité mesuré (——) et simulé (- - - -) dans le profil du sol (0-180 cm) au cours de 6 jours pendant la saison des pluies 1971/72 à Migda (Israël).

Bambey, Sénégal

Pour le test suivant, les données utilisées sont celles d'une expérience sur des arachides, recueillies à Bambey au Sénégal par Dancette (1971 ; 1970). Les données pédologiques ont été utilisées telles que fournies par l'auteur : comme valeur du taux d'humidité à la capacité au champ la valeur à la « capacité de r étention » , et 50 % de cette valeur comme le taux d'humidité au point de flétrissement (Vachaud *et al.* , 1978).

Figure III.3

Evaporation cumulative mesurée (o) et simulée (o noir), en 1968 à Bambey (Sénégal).

L'évapotranspiration cumulative, mesurée et simulée (figure III.3) concordent : donc les pertes d'eau hors du sol sont simulées avec suffisamment de précision. La quantité totale d'eau dans le profil et la répartition entre les couches de sol supérieure et inférieure (respectivement 0 à 50 et 50 à 100 cm) sont également simulées avec suffisamment de précision pour la plus grande partie de la saison de croissance (figure III.4a-c). Des écarts apparaissent clairement entre les journées 240 et 260, où les valeurs simulées se situent nettement en dessous des valeurs mesurées, notamment dans la couche supérieure du sol (figure III.4b). Les taux d'humidité mesurés pendant cette période se situent loin au-dessus de la capacité au champ. Ceci doit être imputé à la pluviosité presque continue (figure III.4a), alors que le transport jusqu'à l'atteinte de la capacité au champ exige en réalité, et contrairement au modèle, plus d'une journée (figure III.4a). Il faut alors s'attendre à ce que le taux d'humidité dans les couches supérieures se fixe à une valeur où la conductivité hydraulique correspond à l'intensité moyenne de la pluviosité. Le taux d'humidité observé de 0,15 cm^3/cm^3, caractérisé par une conductibilité d'environ 10 mm/jour (Vachaud *et al*., 1978), correspond bien aux intensités de pluviosité mesurées. Ceci démontre une fois de plus que, pour une simulation précise du bilan hydrique dans le sol, il faut intégrer dans le modèle les données détaillées de répartition des pluies.

Figure III.4

Pluviosité en 1968 à Bambey (Sénégal ; a) et réserve d'eau mesurée (o) et simulée (o noir) dans la couche du sol de 0 à 50 cm (b), et de 50 à 100 cm (c).

– – – : capacité au champ.

La figure III.5 indique, pour le même lieu, les résultats pour un sol sans végétation. Les valeurs simulées concernant la position du front d'humidification, entre 100 et 150 cm pour la journée 225 et entre 150 et 200 cm pour la journée 252, concordent bien avec les observations. Entre les journées 250 et 260, des valeurs au-delà de la capacité au champ ont été mesurées également ici.

Ces résultats permettent de conclure que, pour les régions avec pluies d'été également, ce modèle donne une description réaliste du bilan hydrique du sol. Pourtant, il faut souligner que la « qualité » des données disponibles pouvant être intégrées dans le modèle, sont déterminantes pour la précision des résultats.

Figure III.5

Taux d'humidité mesuré (——) et simulé (- - - -) dans le profil du sol (0-200 cm) au cours de 6 jours pendant la saison des pluies 1968 à Bambey (Sénégal).

Déductions à partir de la méthode de calcul utilisée dans ce manuel

L'utilisation de modèles de simulation n'apparaît pas évidente pour l'estimation de la production dans le cadre de l'évaluation des pâturages. Généralement, les modèles sont trop complexes, exigent trop de données détaillées pour chaque endroit nouveau ; ils obligent à l'utilisation d'ordinateurs de technique avancée, qui ne sont pas toujours disponibles. L'évaluation détaillée décrite dans ce manuel constitue une exception (II.4). En effet, il faut pour cela résider au même endroit pendant plusieurs années : il est alors conseillé d'utiliser des modèles existants, où encore des modèles nouveaux ou à élaborer. Les connaissances existantes peuvent ainsi être intégrées et révéler des lacunes permettant alors d'orienter les recherches nouvelles.

Pour les situations où la disponibilité en eau détermine la croissance (I < 250 mm), ce manuel utilise une simple équation qui décrit le rapport entre la quantité annuelle d'eau infiltrée (I et la production. Cette équation résulte de calculs basés sur le modèle décrit ci-dessus.

Dans un premier temps, les productions sont calculées pour une série d'années de pluviosité en fonction de types de sols à diverses capacités de rétention d'eau et à différents coefficients de ruissellement. Les chiffres pluviométriques proviennent du CIEH (1974). Le choix des stations pluviométriques a porté sur Goundam et Kidal, toutes deux au Mali, avec respectivement une pluviosité annuelle moyenne de 260 et 140 mm. Pour Goundam, les chiffres retenus sont ceux des années 1955, 1961 et 1976, et pour Kidal, ce sont ceux de 1929, 1938 et 1942. Le critère de sélection appliqué est celui de la plus grande diversité de profils de pluviosité, aussi bien en ce qui concerne les précipitations annuelles qu'en ce qui concerne la répartition sur la saison (saisons avec beaucoup de grosses pluies et saisons avec beaucoup de petites pluies). Par rapport au sol, le choix a porté sur la plus grande variation possible de taux d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement (tableau III.1). Les sols choisis sont des sols homogènes avec une profondeur de 3 mètres. D'autres situations ont été analysées dans III.2.3 . Lors du choix des valeurs numériques pour les coefficients de ruissellement, on a tenu compte des situations les plus courantes dans la pratique. Les dépressions, par exemple, ne comportent pas de sables grossiers, mais les coefficients de ruissellement sur ces sols ne sont jamais importants.

Tableau III.1
Sols, caractérisés par les taux d'humidité ([theta]) à la capacité au champ et au point de flétrissement ;

et par le trajet des coefficients de ruissellement et de concentration des écoulements (R, respectivement positif ou négatif ; caractéristiques utilisées pour les calculs de production avec le modèle de simulation pour la croissance limitée par la disponibilité en eau).

	Sg	Sf	Sl	Ls	L	A
[theta] (pF 2,5)* cm³/cm³	0,055	0,068	0,088	0,095	0,103	0,325
[theta] (pF 4,2) cm³/cm³	0,011	0,019	0,032	0,028	0,030	0,180
R	0,0 à 0,2	-0,2 à 0,3	-0,2 à 0,3	-0,2 à 0,3	-0,4 à 0,5	-0,5 à 0,0

Sg : sable grossier ; Sf : sable fin ; Sl : sable limoneux ; Ls : limon sablonneux ; L : limon ; A : argile ; * = *H* .

Parallèlement au calcul des productions, la quantité d'eau infiltrée annuellement (*I* en mm) a été calculée pour chaque année (*P* en mm) et pour chaque valeur moyenne du coefficient de ruissellement ou de concentration des écoulements (R). Ce calcul a été effectué selon la méthode déjà exposée : $I = P (1 - R)$ (équation II.1).

Ensuite, l'analyse linéaire de régression a permis de déterminer pour chaque type de sol, le rapport entre la production calculée à l'aide du modèle (*B* en matière sèche ; kg/ha) et la quantité infiltrée d'eau (*I* en mm). Il est évident que ce rapport et ce calcul de coefficients de régression n'expriment rien quant à la fiabilité des résultats obtenus avec les modèles. Par contre, l'analyse indique si la quantité annuelle d'eau infiltrée, (calculée de façon relativement simple ; *I*), permet de prédire ce que le modèle aurait révélé, et quelle précision peut être escomptée pour une telle prévision. Les résultats de l'analyse de régression sont indiqués dans le tableau III.2 . Il en ressort que les lignes de régressions calculées, diffèrent peu pour les différents types de sol. C'est pourquoi le choix a porté sur une ligne de régression (r= 0,80), basée sur une analyse de tous les points disponibles :

$$B = 7{,}25\ I - 593 \quad \text{(équation III.1)}$$

Cette équation est utilisée ici pour l'estimation théorique de la production de la strate herbacée, dans des situations où l'infiltration annuelle est inférieure à 250 mm. Dans le cas de sols peu profonds, la disponibilité réelle en eau peut cependant être inférieure à *I*, à cause de pertes par percolation (III.2.3). C'est pourquoi dans la pratique, l'équation est utilisée sous la forme $B = 7{,}25\ (I - Pe) - 593$ (équation II.15 ; *Pe* = pertes annuelles d'eau par percolation, en mm). Sur des sols d'au moins 2 m de profondeur, *Pe* sera égal à 0 dans les conditions mentionnées : $I < 250$ mm. Pour des sols moins profonds, *Pe* a plus de chances d'être supérieur à 0 à mesure que la texture est plus grossière (III.2.3).

Tableau III.2

Rapports définis avec le modèle de simulation par type de sol entre la production annuelle de la biomasse (B, matière sèche en kg/ha) et l'infiltration (I en mm).

	ligne de régression	r
type de sol		
Sg	*B* = 9,53 *I* - 691,5	0,92
Sf	*B* = 8,72 *I* - 724,0	0,90
Sl	*B* = 8,49 *I* - 675,6	0,88
Ls	*B* = 9,20 *I* - 763,3	0,90
L	*B* = 7,74 *I* - 611,1	0,85
A	*B* = 5,33 *I* - 609,9	0,77

Sg : sable grossier ; Sf : sable fin ; Sl : sable limoneux ; Ls : limon sablonneux ; L : limon ; A : argile ; r = coefficient de régression.

La figure III.6 démontre que l'équation représente assez bien la production moyenne pour $I < 250$ mm (la ligne pointillée). La grande dispersion des valeurs mesurées est liée à la répartition des pluies, mais également aux différences de texture entre les sols des 7 sites:
- La plupart des mesures de production pour des pâturages de *Cenchrus biflorus* se situent sur ou au-dessus de la ligne de régression décrite par l'équation. Ceci est logique, car les sites en question présentent un substrat sablonneux (comparer les lignes de régression de Sg et Sf du tableau III.2 avec l'équation III.1).
- Les trois valeurs mesurées pour un pâturage de *Schoenefeldia gracilis* sur sable fin se situent au-dessus de la ligne de régression ; les autres valeurs pour Schoenefeldia sont situées en-dessous et concernent des pâturages sur limon et argile (comparer les lignes de régression de L et A du tableau III.2 avec l'équation III.1).

Figure III.6
Rapport théorique moyen (- - - -) entre la production annuelle de la strate herbacée (B ; matière sèche) et la quantité d'eau infiltrée (I) comparé avec des productions mesurées (——), pendant 3 années successives pour différentes quantités d'eau infiltrée, sur des sites à sols profonds. Les mesures ont été exécutées sur quatre sites dominés par Cenchrus biflorus (o) et sur trois sites dominés par Schoenefeldia gracilis (×).

III.2.2.2. Production déterminée par la disponibilité en éléments nutritifs

Disponibilité en azote et bilan d'azote

Les estimations théoriques de la production pour plus de 250 mm d'infiltration annuelle, reposent sur

une croissance limitée par la disponibilité en azote. Le travail sur le terrain est nécessaire pour détecter les situation dans lesquelles d'autres éléments sont limitatifs (II.3.6.5). La disponibilité en azote varie cependant en fonction de l'endroit et de l'année.

La dynamique des végétations de pâturage dans le Sahel est très forte, aussi bien du point de vue de la qualité que de la quantité, la preuve en est la grande variabilité dans l'espace et dans le temps (Cissé, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 98-133). Pourtant, on peut supposer une situation d'équilibre, en considérant la situation moyenne sur une longue période. Une telle situation d'équilibre est caractérisée, en matière de bilan d'azote, par le fait qu'annuellement il y a autant de pertes d'azote hors du système « sol-plante-animal » qu'il y a d'apport à partir des sources naturelles. Par définition, une telle situation d'équilibre peut être décrite à l'aide de l'équation (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 275-283) :

$$f\ N_b = N_a \qquad \text{(équation III.2)}$$

dans laquelle :
N_b = quantité d'azote (kg/ha) dans la biomasse aérienne lors de la floraison ; cette époque a été choisie car c'est le moment où la végétation contient généralement le maximum d'azote (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 196-226) ;
N_a = quantité d'azote (kg/ha) fournie annuellement par des sources naturelles ;
f = fraction (kg/kg) de N_b disparaissant annuellement hors du système.

Cette équation n'est valable qu'à condition que les pertes d'azote hors du système « sol-plante-animal » concordent (pratiquement) avec les pertes d'azote hors de la biomasse aérienne. En d'autres termes, il faut que les pertes directes à partir de la réserve d'azote dans le sol - dénitrification et/ou lixiviation par l'eau - soient négligeables (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 243-246).

La mesure de N_a et de f permet de calculer N b. Il ne faut pas perdre de vue qu'entre N_a et N_b le rapport est principalement indirect, et ce, pour autant qu'il passe par la réserve de matière organique dans le sol. Dans l'équation III.2 et dans l'équation III.4 qui en découle, il est fait totalement abstraction de la réserve d'azote dans le sol, bien que N_b résulte pour une partie importante de la minéralisation au cours de la décomposition de la matière organique dans le sol (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 228-237).

Apport d'azote dans le système à partir de sources naturelles (N_a)

La quantité d'azote apportée annuellement dans le système (N_a) peut, suivant son origine, être répartie schématiquement en deux fractions : une part qui est liée à la disponibilité moyenne en eau, et l'autre liée à la production annuelle moyenne de matière sèche (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 239-243).

Pour le calcul de la part qui est lié à la disponibilité moyenne en eau, il faut effectuer un choix entre la pluviosité moyenne ou la quantité moyenne d'eau infiltrée. Dans le système, les sources d'azote liées à la disponibilité en eau sont :
- l'azote dissout dans l'eau et fourni à partir de l'atmosphère (NO_3-, NH_3 et NH_4+) ;
- le dépôt sec d'azote sur le sol et sur la végétation (NH_4+), ce dépôt intervient surtout lorsque ces éléments sont humides, ce phénomène est donc lié à la pluviosité ;
- l'azote fixé par les cyanophycées sur la surface du sol.

Lorsque l'eau ne s'infiltre pas en totalité sur place, mais qu'une partie ruisselle en surface, différents raisonnements sont possibles. Pour l'azote en provenance de l'atmosphère, la plus grande partie peut être supposée dissoute dans l'eau tombant au début d'une pluie, ayant ainsi le plus de chances de s'infiltrer sur place. Cet azote provient partiellement de matière soulevée par le vent à partir du sol, partiellement de la volatilisation de l'ammoniaque et de la dénitrification à partir du sol, ou encore en partie de réactions photochimiques. A cause de sa présence dans l'eau tombant au début des pluies, aucune correction de cette quantité ne semble nécessaire pour un ruissellement en surface. Cependant, le ruissellement entraîne des particules de sol et de la matière organique dans laquelle se trouve de l'azote. Une correction s'avère donc quand même utile.

La quantité d'azote fixée par les cyanophycées vivant à la surface du sol, dépend de la durée d'humidification de la surface du sol, car la fixation ne peut avoir lieu que dans ces circonstances. La durée de cette période ne dépend pas seulement de la quantité d'eau qui s'infiltre, mais également du pouvoir d'assèchement de l'atmosphère. Néanmoins, on peut supposer, qu'en moyenne la surface sera plus longtemps humide aux endroits de ruissellement, ne serait ce que parce que la durée d'infiltration y est plus longue.

Toute supposition concernant la quantité d'eau déterminant l'apport d'azote est donc encore arbitraire. Pour le présent objectif, le choix a porté sur la quantité d'eau infiltrée, dans la mesure où la disponibilité en eau pour la végétation dépend aussi de cette donnée (voir section précédente). Cette hypothèse entraîne peut-être une estimation inexacte de l'apport d'azote sur les lieux où l'eau ruisselle en surface et sur les lieux à concentration des écoulements. Il est par conséquent conseillé de rassembler des données expérimentales permettant une vérification.

L'apport d'azote lié à la production moyenne annuelle de biomasse, est constitué à son tour de deux composants : azote atmosphérique fixé par des bactéries vivant en symbiose avec les espèces légumineuses, et azote fixé par des bactéries vivant à l'état libre.

Les végétations naturelles des pays sahéliens comportent un assez grand nombre d'espèces légumineuses, mais celles-ci sont rarement dominantes à cause de la faible disponibilité en phosphore, laquelle joue un rôle important pour la fixation d'azote. Pour de nombreuses espèces, une symbiose effective a en effet été observée avec les bactéries du genre *Rhizobium*. Ces bactéries bénéficient alors des sucres produits par les plantes, alors que les plantes bénéficient de l'azote assimilé par les bactéries.

La quantité d'azote qui rentre dans le système par ce processus, dépend :
- de la production totale de la biomasse ;
- de la part des légumineuses dans la végétation ;
- du taux d'azote dans les plantes et
- de la fraction de la quantité totale d'azote présente dans la végétation à la suite de la fixation (Gillard & Elberse, 1982 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 296-304 ; pp. 434-440).

Le rapport entre la quantité d'azote fixée et la quantité en provenance du sol dépend de facteurs tels que la disponibilité de l'azote minéral, le degré de compétitivité avec les non-légumineuses, l'efficacité de la fixation laquelle est liée entre autres à la disponibilité en eau. Dans le cas présent, on suppose que les légumineuses participent pour 5 % à la production annuelle de la strate herbacée ; 3/4 de leur azote est obtenu par fixation.

En plus des bactéries de la symbiose avec les légumineuses, il existe dans le sol encore deux groupes de bactéries qui sont en mesure de fixer l'azote atmosphérique : les espèces qui présentent une liaison associative avec le système racinaire des plantes vivantes, et les espèces vivant à l'état libre. Le premier groupe se situe dans la proximité immédiate des racines de plantes et utilise des exudats de racines comme source d'énergie. Au cours des dernières années, la présence de ces bactéries a été observée sur un nombre croissant de plantes, mais il existe une grande incertitude quant aux quantités d'azote qui peuvent être fixées sur le terrain. Il semblerait que ces quantités soient plus grandes pour les espèces pérennes à système de racine permanent, que pour les espèces annuelles qui doivent reconstituer chaque année ce système. Puisque la vitesse d'assimilation d'azote dépend directement de la disponibilité en énergie sous forme d'exudats, il a été admis que la quantité annuelle fixée est fonction de la production de biomasse aérienne.

Les bactéries vivant à l'état libre doivent assurer leurs besoins d'énergie à partir de la matière organique fraîche entrant dans le sol. Egalement dans ce cas, la quantité annuelle fixée d'azote peut être supposée dépendante de la production de la biomasse, mais uniquement de la part qui contribue à la matière organique dans le sol, en d'autres termes, de la partie non exploitée.

Pertes annuelles d'azote (f) hors du système

Les pertes moyennes d'azote (f) hors du système sont le résultat de différents processus :

$$f = f_{é} + f_{c} + f_{v} + f_{r} \quad \text{(équation III.3)}$$

dans laquelle,
$f_{é}$ = fraction annuelle de pertes dues à la pâture ;

f_{c} = fraction annuelle de pertes dues aux feux ;

f_{v} = fraction annuelle de pertes par volatilisation d'azote directement hors de la végétation ;

f_r = fraction annuelle de pertes dues à d'autres processus, telles les dégradations dues aux insectes.

La fraction de pertes dues à la pâture n'est imputable que pour une faible partie à l'élimination de l'azote par le biais du bétail et de la production animale, car au Sahel cela ne représente que 5 % de la quantité totale d'azote ingérée par le bétail. La plus grande partie est rejetée par l'animal sous forme d'urine et de fumier, dont une partie se volatilise (van der Meer & van Uum-Van Lohuyzen, 1986). Dans le Sahel, cette part est estimée à la moitié de la quantité d'azote ingérée par le bétail (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 243-244). A cause de la sélectivité du bétail, la part des pertes dues à la pâture représente environ 1,5 fois la fraction de matière sèche broutée (Diallo, 1978) : la préférence va aux composants de la végétation avec le plus haut taux d'azote.

La gestion des pâturages et des troupeaux vise à assurer aux humains une partie maximale de $f_é$ (consommable et commercialisable) en réduisant au maximum les autres pertes (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 450-475).

Pendant la saison sèche, les feux de brousse sont un phénomène courant dans les pays sahéliens. Ces feux sont ou bien accidentels, ou encore volontaires. Dans ce dernier cas, il s'agit surtout d'endroits où les graminées pérennes constituent une grande partie de la végétation, et où les feux servent à se débarrasser d'ancienne matière de mauvaise qualité pour la remplacer par la repousse d'une qualité supérieure. Les feux entraînent la disparition dans l'atmosphère sous forme de gaz, d'une grande part de l'azote de la végétation. Les pertes par le feu sont une fonction de la production annuelle moyenne de matière sèche, car les feux sont plus fréquents au fur et à mesure de l'importance de la production ; en-dessous d'un seuil critique, la végétation est trop clairsemée pour que le feu se répande. Ce seuil est plus bas pour les végétations homogènes ($I \geq P$) que pour les végétations hétérogènes ($I < P$). Ce manuel suppose un accroissement linéaire des pertes moyennes de matière sèche par les feux, de 0 % pour une production annuelle de la strate herbacée de 700 kg/ha, allant jusqu'à 60 % pour 5000 kg/ha. Ces données sont basées sur des observations effectuées au Mali pendant trois années (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 347). Les pertes d'azote représenteront au minimum 80 % des pertes de matière sèche lorsqu'il y a dominance des espèces annuelles, car les feux interviennent souvent après la chute des graines, et les graines renferment environ 20 % de N_b (Cissé, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 120). Lorsque les espèces pérennes dominent, la différence entre les pertes de N_b et les pertes de matière sèche seront encore plus importantes, car, avant le dépérissement de la biomasse aérienne, la moitié de N_b est transférée vers les racines. La valeur de f_c augmente donc du nord vers le sud, mais ne dépassera généralement pas 0,3.

L'ammoniaque (NH_3) est un produit intermédiaire dans un certain nombre de métabolismes de la plante, et des concentrations mesurables de NH_3 ont été mises en évidence dans les stomates. Ceux-ci étant en contact direct avec l'atmosphère, le NH_3 peut se diffuser vers l'extérieur (Farquhar *et al.*, 1983). Ce processus est surtout important dans les feuilles vieillissantes, dans lesquelles il y a décomposition et

transport accéléré des protéines, ce processus étant encore dynamisé par des températures élevées. Dans les pays sahéliens, les conditions favorisant ce processus sont donc presque idéales pendant la phase de mûrissement. Aussi, les pertes constatées pendant cette phase sont considérables (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 218-222). Il existe peu de données concernant les pertes pendant la saison sèche, et d'ailleurs ces données ne sont pas uniformes. Pour le Sahel, la valeur de f_v est estimée à 0,20.

De plus, il y a également pertes d'azote résultant des dégradations dues aux insectes et autres animaux. Ces pertes sont difficilement quantifiables de manière précise, aussi l'estimation de f_r est assez arbitraire. Certaines indications peuvent cependant être relevées à partir de mesures de N_b, dans des situations où la végétation est protégée contre la pâture et les feux. Dans une telle situation la valeur f_r pour la région est estimée à 0,1.

La figure II.4 a été établie sur la base de l'interprétation des observations sur le terrain : les pertes totales moyennes en fonction de la pluviosité moyenne. Les estimations des valeurs de f sont un peu en-dessous de celles de Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 305), mais l'équation III.4 se rapproche ainsi au maximum de la réalité.

Le choix de la variable indépendante a porté sur la pluviosité moyenne et non sur *I*, car il n'existait pas de données permettant de préciser les différentes pertes par rapport au ruissellement et par rapport à la concentration des écoulements. D'autre part, les pertes varient vraisemblablement moins que proportionnellement aux variations de disponibilité en eau résultant de la redistribution.

Equation N_b

La quantité d'azote entrant annuellement dans le système par les processus décrits ci-dessus (N_a) a été quantifié par rapport à la quantité d'eau infiltrée et à la production de la biomasse (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 226-263). Cette quantification a été effectuée sur la base de travaux expérimentaux au Mali et d'une recherche approfondie dans les ouvrages spécialisés. L'introduction de ces valeurs dans l'équation III.2 donne l'équation suivante :

$$N_b = 0{,}0083\ I\ /(f-0{,}13) \qquad \text{(équation III.4)}$$

La documentation relative à la dérivée de cette équation est exposée dans les ouvrages de Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 275-283) et de de Ridder *et al.*, (1982). La dérivée est utilisée ici pour l'estimation théorique de la production, dans les situations où la quantité d'eau infiltrée dépasse 250 mm par an.

Le réajustement ci-dessus des valeurs f vers le bas (sur la base de l'expérience acquise avec cette

équation) démontre que la compréhension des processus du bilan d'azote, lesquels déterminent la disponibilité en azote, est encore limitée. La question peut alors se poser de savoir pourquoi utiliser cette équation, au lieu des valeurs empiriques. Ces dernières sont cependant tellement liées au temps et à l'emplacement que toute extrapolation est pratiquement exclue. De plus la voie vers une compréhension plus large serait bloquée.

L'équation peut être appliquée aux sols dont la disponibilité moyenne en éléments nutritifs est celle de la région ; pour les situations divergentes (N_s [est inégal à] N_b ; II.3.6.5) d'autres valeurs numériques devront être introduites. L'application de l'équation entraînera une surestimation de N_b et de la production, dès lors qu'il y a pertes d'azote hors du sol par dénitrification et lixiviation. La valeur utilitaire de cette équation diminue donc dans les cas de pluviosité croissante, de concentration des écoulements et de formation de flaques d'eau (et les risques d'anaérobie allant de pair). Pour augmenter au maximum la valeur d'utilisation de l'équation, une correction est apportée à *I* dans le cas de percolation, pour l'eau qui disparaît hors des sols peu profonds et hors de la partie des sols plus profonds comportant des racines (III.2.3). C'est pourquoi dans II.2.2.4 et II.3.4 , l'équation est présentée sous la forme N_b = 0,0083 (*I-Pe*)/(f-0,13), dans laquelle *Pe* = les pertes annuelles d'eau par percolation, exprimées en mm (équation II.7). *Pe* est égal à 0 tant que l'humidification du profil du sol est inférieur à 2 m, alors que les pertes par percolation sont négligées lorsque les espèces pérennes (espèces herbacées et/ou ligneuses) constituent des composants importants de la végétation (III.2.3).

La figure III.7 représente en trois dimensions le rapport entre N_b, la quantité d'eau infiltrée (*I*) et les pertes annuelles (f). Cette figure représente une série de situations d'équilibre, lesquelles peuvent être obtenues après une suite d'années où les valeurs de *I* et f sont moyennes. Lors de l'élaboration de la figure, les valeurs moyennes de f ont été supposées varier entre 0,3 et 1,0. En théorie, la valeur peut varier entre un peu plus de 0,13 et 1,0. Il est évident que l'équation III.4 ne peut être utilisée que pour les valeurs de f supérieures à 0,13. Compte tenu des estimations de f_v et de f_r, ceci sera toujours le cas, à moins qu'il ne soit question d'apport d'engrais (chimique). Dans la pratique, les pertes d'azote dans une végétation protégée totalement contre les feux et la pâture, seront encore toujours au minimum de 25 % (f = 0,25), car les pertes résultant de la volatilisation et des dégradations dues aux insectes ne peuvent être évitées. Pourtant, des valeurs moindres sont possibles, dans une végétation protégée, composée pour une part importante de graminées pérennes et/ou d'espèces ligneuses. En effet, à la fin de la saison de croissance, il y a transfert des éléments nutritifs à partir de la biomasse aérienne vers les parties souterraines.

Figure III.7

Rapport entre N_b, la quantité d'eau infiltrée et la fraction de N_b perdue annuellement (f).

La limite inférieure de quantité d'eau infiltrée pour laquelle l'équation est valable, correspond au seuil défini auparavant entre la croissance limitée par l'eau et celle limitée par les éléments nutritifs, alors que la limite supérieure a été fixée arbitrairement à 1200 mm. En principe, la surface hachurée de la figure

indique les valeurs possibles de N_b.

Il ressort de la figure III.7 que les valeurs N_b les plus élevées sont atteintes lors d'une protection maximale. Toute forme d'exploitation entraîne une valeur plus faible de N_b. Les valeurs les plus basses apparaissent lors d'une exploitation maximum (f = 1,0), comme par exemple lors de la fenaison annuelle au moment de la floraison.

Pour une quantité donnée d'eau infiltrée, de grandes différences peuvent apparaître dans N_b par suite de différences d'intensité d'exploitation. Ceci n'est pas seulement dû au fait que l'exploitation provoque des pertes (f augmente), entraînant une diminution de retour d'azote dans le sol. La réserve du sol en matière organique diminue en conséquence, réduisant ainsi la disponibilité annuelle d'azote pour la végétation. Dans des circonstances de croissance limitées par l'azote, la production moyenne de la biomasse est moindre tout comme l'apport annuel d'azote lié à la production de la biomasse. Il s'agit par exemple de la fixation de l'azote atmosphérique. Ceci entraîne également des conséquences négatives pour la réserve du sol en matière organique et donc en azote.

III.2.2.3. Observations sur l'utilisation des équations

Transition entre production limitée par l'eau et par les éléments nutritifs

Dans ce manuel, la transition entre la production limitée par l'eau et celle limitée par les éléments nutritifs est fixée à 250 mm d'eau infiltrée. En réalité cette transition n'est naturellement pas aussi abrupte. Il est plutôt question d'une zone de transition où la disponibilité accrue de l'eau va de pair avec une production de plus en plus limitée par les éléments nutritifs. Les estimations de production basées sur l'équation $B = 7{,}25\ I - 593$, surestimeront donc la réalité lorsque la quantité d'eau infiltrée s'approche de 250 mm : en effet, la disponibilité limitée en éléments nutritifs joue alors un rôle de plus en plus important. De même, les estimations basées sur l'équation pour la disponibilité en azote $N_b = 0{,}0083\ I / (f - 0{,}13)$ s'écarteront de la réalité, lorsque la quantité d'eau infiltrée dépasse de peu 250 mm. Cet écart vient du fait que de nombreuses suppositions, établies lors de l'élaboration de l'équation N_b, ne se vérifient plus. Ainsi, le pouvoir de fixation d'azote par les légumineuses, les algues et les micro-organismes vivant en liberté, sera inférieur aux suppositions, car le risque d'apparition régulière de périodes sèches pendant la saison de croissance augmente dans le cas d'une plus faible pluviosité ; de plus, la durée de la période pendant laquelle la disponibilité en azote limite la croissance diminue parallèlement. Ces phénomènes diminueront fortement la fixation de l'azote atmosphérique.

C'est la raison pour laquelle les résultats des deux équations peuvent accuser de grandes différences pour cette plage de transition. A titre d'illustration, la biomasse a été calculée à l'aide des deux équations pour 250 mm d'eau infiltrée et pour une situation où $I = P$: l'équation destinée à la croissance limitée par l'eau débouche sur une production de 1220 kg/ha, alors que celle destinée à la croissance limitée par les éléments nutritifs conclut à 1130 kg/ha (f = 0,32 ; taux d'azote de 9,7 g/kg de matière sèche).

La concordance est satisfaisante, mais il s'agit là d'un hasard. Si la situation choisie n'avait pas été $I = P$, mais $I = 0,5 \times P$ ou $I = 1,5 \times P$, l'équation III.1 aurait dans les deux cas conclu à une production de 1220 kg/ha, alors que l'équation III.4 aurait entraîné des productions de respectivement 610 et 1630 kg/ha. Il est vrai que lorsque $I = 250$ mm, l'équation donne pour chacune des trois situations une seule valeur pour N_b : 10,9 kg/ha, mais selon la figure principalement empirique II.2.2.4.2, le taux d'azote est de 18,0 g/kg lorsque $I = 0,5 \times P$, de 9,7 g/kg lorsque $I = 1,0 \times P$ ou de 6,7 g/kg lorsque $I = 1,5 \times P$.

L'origine de la disparité entre les résultats obtenus avec les deux équations, provient du fait déjà mentionné selon lequel la limite entre les régions à croissance limitée par l'azote et celles à croissance limitée par l'eau ($I = 250$ mm) n'est pas absolue. Pour une infiltration inférieure à 250 mm, il y aura généralement une croissance limitée par l'eau pendant plus de la moitié de la période de croissance. A l'approche de $I = 250$ mm, la période de croissance limitée par l'azote augmentera, il sera donc question d'une dilution de l'azote absorbé. C'est la raison, en plus de considérations pragmatiques, de l'utilisation de la figure II.3 pour l'estimation du taux d'azote à la fin de la saison de croissance, même lorsque $I < 250$ mm. Si toute la croissance était limitée par la disponibilité en eau, il faudrait utiliser un taux d'azote de $\geq$ 20 g/kg jusqu'à $I = 250$ mm (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 202). Lors de l'utilisation de l'équation III.1, la production d'azote pour $I = 250$ mm serait alors supérieure ou égale à $1220 \times 0,020 = 24,4$ kg/ha, alors que l'équation III.4 indique 10,9 kg/ha. Il n'y a cependant aucune raison de supposer que la production d'azote pour $I \leq 250$ mm soit plus importante que celle pour $I \geq 250$ mm, c'est plutôt le contraire qui est vraisemblable. C'est la raison pour laquelle une valeur maximum a été fixée pour l'équation II.16. Ceci signifie également que la biomasse maximum sur la base d'une croissance limitée exclusivement par l'eau, est de $10,9/0,020 = 550$ kg/ha. Selon l'équation III.1, cette biomasse est atteinte pour $I = 160$ mm. Lorsque I est plus élevé, il faut donc s'attendre à une période de croissance limitée par l'azote pour une partie de la saison de croissance.

Tant qu'il n'existe pas de modèles décrivant les bilans hydriques et les bilans d'éléments nutritifs (notamment N et P), il sera difficile d'obtenir une quantification plus fiable dans la plage de transition entre la croissance limitée par l'eau et celle limitée par les éléments nutritifs. Dans ce manuel, le choix a porté sur la solution pragmatique, c'est-à-dire que la croissance est supposée limitée entièrement par l'eau jusqu'à 250 mm, néanmoins le taux d'azote est déterminé à l'aide de la figure II.3. Selon cette figure, dans la pratique, la dilution de l'azote commence déjà pour une pluviosité de plus de 100 mm. Les mesures de biomasse qui divergent de façon significative de la biomasse théorique ne doivent pas être utilisées automatiquement pour conclure à l'impossibilité de décrire la production du lieu en question à l'aide de l'équation III.1. Une pareille conclusion n'est possible que lorsque la différence ne provient pas d'une autre dilution de l'azote que celle mentionnée dans la figure II.3.

Valeur f et exploitation des pâturages

Dans la pratique, les valeurs f se situent entre 0,3 et 0,5 (II.3.4). La raison de ce peu de variation provient du fait que la valeur f est composée de pertes dues à différents processus interdépendants. Lorsque la perte due à un de ces processus est grande, les pertes dues aux autres processus diminuent :

les pertes d'azote dues à la pâture ne pourront plus se produire par les feux, par la volatilisation ou d'autres causes. L'augmentation dans le sens nord/sud de la valeur f, est occasionnée principalement par un accroissement de pertes dues aux feux.

L'interdépendance des processus partiels rend complexe l'estimation de la valeur totale de f. Dans leur ouvrage, Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 450-475) analysent un grand nombre d'exemples dans lesquels la valeur de f est estimée dans des situations diverses. Ce manuel se limite à deux exemples. En l'absence de données fiables concernant la moyenne sur plusieurs années de pertes dues à la pâture, aux feux ou à la fenaison en plus du transport, il est préférable d'utiliser la figure II.4.

Le premier exemple traite d'un pâturage composé d'espèces annuelles dans le sud du Sahel, lequel est soumis pendant la saison sèche (9 mois) à une forte intensité de pâture. Il a été constaté que ce pâturage brûle une fois tous les six ans.

Dans le cas d'une pâture maximum pendant la saison sèche, la consommation peut représenter 35 % de la biomasse, et le taux d'azote de la biomasse consommée sera environ 1,5 fois supérieur (pâture sélective) au taux d'azote moyen. La consommation d'azote est alors de 1,5 × 35 = 52,5 % de l'azote présent au début de la saison sèche dans la biomasse aérienne. Ceci revient à 5,8 % par mois, dans l'hypothèse d'une consommation mensuelle uniforme pendant la saison sèche (9 mois). Sur ce pourcentage, il y a 52,5 % de pertes (5 % pour le lait et la viande ; 50 % de (100-5 %) pour la volatilisation à partir de l'urine et des fèces), ce qui aboutit à une perte d'azote par pâture de 28 % ($f_{é}$ =0,28). Ceci revient à 3,1 % par mois dans l'hypothèse d'une perte mensuelle uniforme.

Les pertes par volatilisation (f_v) et autres (f_r) pendant la saison sèche, représentent au maximum 25 % de l'azote encore présent au début de la saison sèche dans la biomasse aérienne ($f_v + f_r = 0,25$). En l'absence d'autres pertes, ceci équivaudrait à 2,8 % mensuellement.

Les pertes pendant le premier mois de la saison sèche, dues à la pâture, à la volatilisation et autres, se montent à 5,9 % mais diminuent pendant les mois suivants, car les premières pertes par pâture ne peuvent se reproduire par volatilisation et autres pendant le mois suivant. Les pertes par volatilisation et autres pendant les mois qui suivent, peuvent être calculées en confrontant ces pertes avec l'azote subsistant du mois précédent. Après le premier mois, 91 % de l'azote (5,8 % consommé par le bétail et 2,8 % perdu par volatilisation ou d'autres causes) reste disponible pour les pertes par volatilisation ou autres pendant le second mois. Cette perte sera de (0,028 × 91). Cumulées aux pertes par pâture, les pertes totales pendant le second mois seront de 8,3 %. En poursuivant ce calcul de la sorte, les pertes totales pendant 5 années, années sans feux, sur 6 sont de 45 % par an. Les pertes par volatilisation ou autres sont de 1,9 % en moyenne par mois, contre 2,8 % en l'absence de pâture.

Au cours de la sixième année, les pertes sont plus importantes. Dans l'hypothèse où les feux apparaissent le plus souvent en février (au milieu de la saison sèche) et que les graines ne brûlent pas, les pertes totales pendant l'année en question sont au minimum de 72 % (100 % moins 20 % pour la tombée des

graines et moins 8 % pour l'azote ingéré par le bétail pendant les cinq premiers mois de la saison sèche, mais qui restent conservés pour le système par le biais de l'urine et des fèces).

Les pertes moyennes totales sont alors : ((5 × 45 %) + (1 × 72 %))/6 = 50 %.

Dans le second exemple, le même pâturage est soumis à la pâture pendant la saison des pluies uniquement. On a constaté que pour une pâture pendant la saison des pluies, la consommation est au maximum de 50 % de la biomasse, le taux d'azote de cette biomasse consommée est équivalent à celui de la biomasse (pâture peu sélective ; Diallo, 1978). Sur ce pourcentage, il y a 52,5 % de pertes, ce qui entraîne une perte par pâture de 26 % ($f_é$ = 0,26).

L'azote qui subsiste à la fin de la saison de croissance et qui est exposé à d'autres pertes, représente la moitié de celle de la biomasse d'origine. Pendant cinq années sur six, les autres pertes pendant la saison sèche sont égales à 0,25 × 50 = 12,5 %. Les pertes totales pendant ces années s'élèvent ainsi à 26 + 12,5 = 38,5 %. Pendant l'année où les feux se déclarent, les pertes totales sont de 56 %, ce qui fait que la valeur moyenne de f sur l'ensemble des années est de 0,41.

Lorsque l'estimation des pertes concerne des pâturages dans lesquels les espèces pérennes déterminent pour une part non négligeable la production annuelle, il faut tenir compte du transfert d'azote à la fin de la saison de croissance ; l'azote est ainsi protégé contre les pertes.

De manière analogue, il est possible de vérifier quels sont les effets de certaines mesures de gestion sur la valeur f et sur sa composition. L'exemple de la fenaison a déjà été cité. Dans l'hypothèse où la fenaison aurait lieu chaque année au moment de la floraison, lorsqu'un maximum d'azote se trouve dans la biomasse aérienne, et dans l'hypothèse où le fumier produit ne serait pas retransporté sur le pâturage fauché (alimentation en étable), la valeur f s'approcherait de 1,0.

Toute mesure de gestion visant à modifier la valeur de f et sa composition, entraînera une modification dans la quantité d'eau infiltrée (*I*). Ceci vient du fait que toute modification de la valeur de f entraînera à la longue une augmentation ou une diminution de la valeur *N* b et de la biomasse qui va de pair. Il en résulte une modification du recouvrement du sol, avec tout ce que cela implique pour le coefficient de ruissellement. Une protection de la végétation contre les feux et la pâture ne diminuera donc pas seulement les pertes d'azote (plus faible valeur f) mais augmentera également les apports d'azote dans le système (*I* plus élevé) à cause de la diminution de ruissellement. Inversement, dans le cas d'une pâture intensive, comme dans l'exemple précité où il y a combinaison de fenaison lors de la floraison et d'alimentation en étable, ce ne sont pas seulement les pertes d'azote qui seront très élevées (f approche de 1,0), mais les risques de ruissellement augmentent et par conséquent l'apport d'azote diminue.

Situations de non-équilibre

L'équation N_b est basée sur une situation d'équilibre. On suppose que, sur une longue période, pertes et

apports annuels d'azote s'annulent. Le N_b moyen concernant une longue période reste inchangé pour une valeur moyenne f qui s'y rapporte et une quantité moyenne d'eau infiltrée (*I*). Ceci n'exclut pas toute variation d'une année sur l'autre de la quantité d'azote dans la biomasse aérienne (Harpaz, 1975). Ce point sera traité plus en détail dans III.2.3.

L'hypothèse de cette situation d'équilibre exclut cependant toute modification de la réserve d'azote organique dans le sol. Si, par suite d'une modification de l'utilisation des terres, la valeur f augmentait, cela ne résulterait pas directement en une valeur plus faible de N_b liée à la valeur f. Il a déjà été rappelé que N_b résulte principalement de la minéralisation au cours de la décomposition de la matière organique dans le sol. N_b est estimé à peine supérieur à 1 % de l'azote contenu dans cette matière organique (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 227). Même lorsque f = 1,0 (fenaison sans apport d'engrais), il faudrait donc environ 100 ans avant d'épuiser la réserve. En réalité, l'effet sur la production se produirait beaucoup plus rapidement, car dans le cas d'une consommation annuelle de la totalité de la production, le potassium, le phosphore ou le soufre deviendraient rapidement limitatifs à la place de l'azote. D'autre part, la vitesse de minéralisation diminuerait car seule une fraction limitée de la matière organique se minéralise facilement.

Ainsi, une période assez longue sera nécessaire avant qu'une meilleure prévention contre les feux ou une (ré)introduction des graminées pérennes et des espèces ligneuses (plus faible valeur de f), permette d'obtenir une valeur N_b plus élevée (accroissement de la réserve d'azote organique du sol ; Kessler & Breman, 1990). Il en va différemment pour la stimulation des légumineuses par l'apport d'engrais phosphatés, car le surplus d'azote provient alors de la fixation. Dans ce cas, même l'équation N_b ne peut plus être utilisée, car les valeurs numériques ne valent que pour la disponibilité moyenne en phosphore.

En principe, dans le nord du Sahel, une production limitée par les éléments nutritifs peut intervenir là où l'eau infiltrée est inférieure à 250 mm. Une pâture plus intensive peut finalement entraîner une croissance limitée par l'azote, après que la réserve d'azote dans la matière organique ait été entamée. Cette augmentation de l'intensité d'exploitation peut par exemple être obtenue par le creusement de puits d'abreuvement permettant la pâture pendant la saison sèche. Ce risque est le plus grand sur des sols non sensibles au compactage superficiel, telles les dunes de sable à texture grossière (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 369).

III.2.3. Situations s'écartant de la moyenne

L'estimation de N_b est au centre de la méthode d'évaluation. Bien que dans le cas d'une production limitée par l'eau, le calcul de la biomasse se fasse en premier, ce calcul sera également suivi par l'estimation de N_b à l'aide du taux d'azote (figure II.3). La valeur théorique de N_b estimée à l'aide des équations, est gouvernée par le bilan hydrique, qu'il s'agisse d'une production limitée par l'eau ou par les éléments nutritifs. Les rapports entre le bilan hydrique et N_b sont basés sur des données recueillies à

divers endroits au Mali (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 226-246 et 304-322). Il a déjà été souligné que les valeurs numériques de l'équation III.4 concernent la fertilité du sol à ces endroits. Dans la procédure d'évaluation, la fertilité du sol est en principe supposée la même en tous endroits. Les observations sur le terrain visent cependant entre autres à vérifier si la fertilité du sol à ces endroits s'écarte nettement de la théorie. Cette vérification s'effectue à l'aide des valeurs mesurées d'azote dans la biomasse aérienne. Lorsque les valeurs mesurées sont de loin supérieures ou inférieures au N_b théorique, il faut en conclure que la fertilité du sol est de loin supérieure ou inférieure, et une rectification de la production théorique s'impose (II.3.6.5).

Avant de pouvoir comparer les valeurs N_b et les valeurs mesurées, il faut quantifier les influences spécifiques propres à l'année et à l'endroit (autres que la fertilité du sol), de manière à pouvoir corriger les valeurs mesurées d'azote. Il est ainsi possible d'obtenir des valeurs comparables aux valeurs « moyennes » comparables aux valeurs établies par la théorie (II.3.6.4).

Sont décrites ci-après des méthodes de quantification des effets que peuvent avoir sur l'azote de la biomasse aérienne, la quantité des pluies, leur répartition et leur importance ainsi que la profondeur du sol. La méthode permettant de quantifier les effets des espèces ligneuses est traitée dans III.2.6. Les méthodes pour quantifier les effets de la composition floristique (quote-part de légumineuses et de graminées pérennes) sur l'azote dans la biomasse aérienne sont décrites dans II.3.6.4 et 5.

Différences dans la quantité et la répartition des pluies

Dans la situation d'équilibre, on suppose que le résultat net de minéralisation et d'immobilisation d'azote en provenance de la matière organique du sol, est nul. Ceci est valable à long terme, mais n'exclut pas d'importantes variations d'une année sur l'autre.

La quantité d'azote qui se libère lors de la décomposition de matière organique dépend de la quantité décomposée et de la composition de cette matière (van Veen, 1977). La composition moyenne de la matière organique ne différera pas fortement d'une année sur l'autre. On suppose que la variabilité annuelle est surtout occasionnée par la quantité qui se décompose. Cette décomposition nécessite des micro-organismes, dont l'activité dépend de circonstances extérieures. Un taux favorable d'humidité dans le sol constitue une condition importante ; dans des conditions non humides, l'activité des micro-organismes diminue fortement ou s'arrête (de Bruin *et al*., 1989, Stanford & Epstein, 1974 ; Robinson, 1957). Il serait donc logique que la quantité d'azote qui se libère pendant une année donnée à partir de la matière organique, soit liée à la durée et à la profondeur d'humidification du profil du sol (« humidité intégr ée du sol » ; van Keulen *et al*., 1986).

Puisque le taux de matière organique dans le profil du sol diminue au fur et à mesure de la profondeur, l'humidification des couches plus profondes du sol aura moins d'effet sur la quantité d'azote qui sera rendue disponible. Pour un site donné, il faut donc s'attendre à une relation entre « l'humidité intégr ée du sol » et l'absorption d'azote. La durée et la profondeur d'humidification d'un profil à un endroit donné

varie d'une année sur l'autre en tant que fonction de la quantité, de la répartition et de l'importance des pluies ; cette variation entraîne une variation de l'absorption d'azote. Pour décrire ce phénomène, il faut quantifier les effets des différences de pluviosité, de répartition et d'importance des pluies, sur la durée et la profondeur d'humidification.

En utilisant les quantités d'azote dans la biomasse aérienne, mesurées pendant quatre années à 30 sites sur un trajet nord-sud au Mali, et « l'humidité int égrée du sol » qui a été estimée pour chaque site et chaque année de pluviosité à l'aide du modèle de bilan hydrique décrit auparavant, il est possible de vérifier le rapport supposé.

La figure III.8 représente les quantités mesurées d'azote dans la biomasse aérienne par rapport à la profondeur calculée d'humidification du profil du sol. Les valeurs sont normalisées en fonction d'une participation de 5 % des légumineuses dans la production annuelle. L'analyse n'a pas fait ressortir de rapport évident entre les quantités mesurées d'azote d'une part et le produit durée × profondeur d'humidification d'autre part. Il est possible que cela soit lié au maximum de minéralisation qui ne se produit que pendant quelques jours après l'humidification d'une couche du sol (Birch, 1958, 1959 et 1960 ; Blondel, 1971a, 1971b et 1971c). L'humidification de la plupart des couches du sol est plus longue pendant la saison de croissance, et la durée de l'humidification pour la minéralisation est donc pratiquement toujours maximale.

Figure III.8

Quantité mesurée d'azote dans la biomasse aérienne de 30 sites sur un trajet nord-sud au Mali pendant 4 années successives (normalisée selon 5 % de légumineuses) et récolte moyenne d'azote, par rapport à la profondeur simulée d'humidification (pr_h) du profil.

[rond] 2 observations ; l [rond noir] 3 observations.

La figure III.8 est très prometteuse, mais n'indique pas de rapport univoque. Il existe une cause importante à ce manque d'explication : la profondeur d'humidification n'est pas seulement dépendante de la totalité des pluies annuelles, elle est aussi fortement influencée par la répartition et l'importance des pluies. Dans la plupart des cas, il n'existait pas de données pluviométriques concernant les sites étudiés, aussi a-t-il fallu utiliser celles de stations éloignées (distantes de quelques km jusqu'à 100 km) pour la simulation de la profondeur d'humidification. Ceci a pu introduire une forte imprécision, compte tenu de la grande variabilité géographique en matière de pluviosité totale et de répartition des pluies.

Le rapport entre la profondeur d'humidification et l'absorption d'azote par la végétation apparaît plus clairement, lorsque chaque site est considéré séparément (figure III.9). Il ressort de cette figure qu'il existe un rapport spécifique pour chaque site, lequel est probablement lié à la quantité totale, la qualité et la répartition de la matière organique dans le profil. En principe, on distingue les « situations extrêmes » et toutes les situations intermédiaires (figure III.9) :
- profils avec une grande quantité de matière organique et un fort gradient de taux en fonction de la profondeur (I) ;
- profils avec une grande quantité de matière organique et un faible gradient en fonction de la profondeur

(II) ;
- profils avec une faible quantité de matière organique et un fort gradient de taux en fonction de la profondeur (III) ;
- profils avec une faible quantité de matière organique et un faible gradient de taux en fonction de la profondeur (IV).

La quantité de matière organique dans le sol est notamment déterminée par les conditions climatologiques (pluviosité par ex.) et par l'historique d'utilisation d'un endroit déterminé ; par ailleurs, la disponibilité en minéraux joue un rôle important. Une pluviosité plus importante entraîne une végétation abondante et la formation de matière organique, alors que l'exploitation de la végétation entraîne une diminution (valeur f élevée). Les différences d'exploitation se concrétisent par des différences de taux de matière organique dans des sols sous le couvert des forêts et dans ces mêmes sols après quelques années de culture (Siband, 1972).

La répartition de la matière organique dans le profil est liée à la profondeur du développement du profil qui, à son tour, dépend des caractéristiques du sol et des caractéristiques du climat. Une pluviosité accrue entraîne un développement plus profond du profil, alors qu'une même quantité de pluie s'infiltrera plus profondément dans les sols sablonneux que dans les sols argileux, occasionnant un développement plus profond du profil.

En moyenne, le taux de matière organique et la profondeur du développement du profil augmenteront parallèlement à la pluviosité, du nord vers le sud. Pour déduire la production dans une année normale à partir de mesures effectuées pendant une année quelconque (II.3.6.4), et la production d'une année sèche à partir d'une année normale (II.2.2.4), le choix a porté sur la courbe telle qu'elle apparaît dans la figure III.8, en supposant que cette courbe représente la moyenne. Dans le cas d'une infiltration de plus de 2 mètres de profondeur, On suppose que l'azote absorbé n'augmente plus, car il s'agit là de la profondeur maximale supposée de pénétration des racines des espèces annuelles. Par ailleurs, le taux de matière organique et donc la disponibilité en azote dans les couches plus profondes est négligeable. Nos observations confirment que, même pour une pluviosité plus importante (Sotuba, Mali, 1100 mm), l'azote absorbé n'augmente pas.

Figure III.9

Variations de la quantité mesurée d'azote dans la biomasse aérienne, sur 30 sites d'un trajet nord-sud au Mali pendant quatre années successives (normalisées selon 5 % de légumineuses). Ces variations sont représentées par rapport à la profondeur simulée d'humidification (pr_h du profil. Le tout sur l'arrière-fond du rapport théorique entre l'adsorption d'azote lors de la floraison et la profondeur d'humidification du profil, dans le cas de différentes quantités de matière organique et de répartition dans le profil.

Beaucoup de matière organique, concentrée dans les couches supérieures (I), ou répartie régulièrement dans tout le profil (II) ; peu de matière organique, concentrée dans les couches supérieures (III), ou répartie régulièrement dans le profil (IV).

Compte tenu des variations importantes entre les sites, le choix a porté sur une représentation relative, dans laquelle l'azote absorbé à < 2 m de profondeur est fixé à 1,0 (figure II.7). Mais lorsque la standardisation d'une année quelconque vers une année normale concerne une production d'azote pour I < 120 mm, la courbe de la figure III.8 est utilisée directement (équation II.20).

En principe, pour une croissance limitée par l'eau (I < 250 mm), il ne devrait pas être nécessaire d'avoir recours à la méthode relativement compliquée mentionnée ci-dessus pour faire entrer en ligne de compte les différences pluviométriques d'une année sur l'autre : en effet, la production est proportionnelle à l'infiltration (équations II.15 et II.1). Mais la limitation de croissance due à un manque d'eau proprement dit ne s'applique généralement qu'à une partie de la période de croissance (III.2.2.3), aussi la préférence est donnée à une utilisation constante des figures II.7 ou III.8. C'est pourquoi, il faut après le calcul de la production, déterminer la production d'azote (équation II.16) à l'aide de l'équation II.15. A l'aide de l'estimation de la profondeur d'humidification pour une année moyenne, et à l'aide de la profondeur d'humidification (estimée ou mesurée) de l'année de mesure, ainsi que des fractions correspondantes à ces profondeurs, il est possible de calculer un facteur de correction permettant de normaliser l'azote absorbé pendant l'année de mesure vers une année moyenne.

Les données nécessaires à l'utilisation des figures II.7 et III.8 seront mesurées ou estimées (voir ci-après). Ces données concernent la profondeur d'humidification du sol pendant l'année d'évaluation, pendant une année normale et pendant une année sèche.

Estimation de la profondeur d'humidification

La profondeur d'humidification d'un profil est fonction de la quantité d'eau qui s'infiltre, de la capacité de rétention du sol et de la quantité d'eau soustraite au profil par la végétation et l'évaporation. L'influence de la multitude de facteurs sur la profondeur d'humidification ne peut être quantifiée qu'au moyen de modèles de simulation (III.2.2.1). Pour le cas où les utilisateurs de ce manuel ne disposent pas de tels modèles ni de l'appareillage nécessaire, une méthode plus simple a été mise au point permettant de déduire la profondeur d'humidification à partir de la quantité d'eau infiltrée (I) et de la texture du sol. Une fois encore ce sont les résultats des simulations effectuées avec le bilan hydrique décrit précédemment qui ont été utilisés.

Tableau III.3
Taux d'humidité à la capacité au champ (pF 2,5), au point de flétrissement (pF 4,2) et différence entre les deux (= disponibilité en eau) pour des sols de textures diverses. Ces éléments ont été utilisés dans les simulations pour le calcul de la profondeur d'humidification.

fraction sablonneuse (%)	fraction argileuse (%)	[theta] (pF 2,5) (cm^3cm^3)	[theta] (pF 4,2) (cm^3cm^3)	disponibilité en eau (cm^3cm^3)

90,3	2,7	0,075	0,025	0,05
49,4	39,2	0,275	0,225	0,05
64,7	16,4	0,20	0,10	0,10
13,7	43,8	0,45	0,25	0,20
54,5	16,4	0,25	0,10	0,15
13,7	53,0	0,45	0,30	0,15
44,3	16,4	0,30	0,10	0,20
13,7	43,8	0,45	0,25	0,20
34,1	16,4	0,35	0,10	0,25
13,7	34,7	0,45	0,20	0,25
23,9	16,4	0,40	0,10	0,30
13,7	25,5	0,45	0,15	0,30

Sur 10 stations pluviométriques situées sur un trajet nord-sud au Mali, la sélection a porté sur 50 années (CIEH, 1974). Les critères utilisés lors de la sélection ont été les suivants : un éventail aussi grand que possible de la pluviosité annuelle (64 - 1196 mm/an) et un maximum de variation dans la répartition et l'importance des pluies. Le tableau III.3 regroupe les caractéristiques des types de sols choisis : taux d'humidité au point de flétrissement, à la capacité au champ et disponibilité en eau. Pour chaque combinaison pluviosité/type de sol, la profondeur d'humidification maximale du profil pendant la saison a été calculée à l'aide du modèle de simulation. Ensuite, analyse a été faite du rapport entre :
- la quantité d'eau infiltrée - calculée selon la méthode d'usage dans ce manuel ($I = P\ (1 - R)$)
- et la profondeur d'humidification calculée à l'aide du modèle, par rapport aux caractéristiques du sol.

Figure III.10

Profondeur d'humidification du profil (pr_h) par rapport à la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour des types de sol dont le taux d'humidité varie (cm³/cm³) à la capacité au champ (pF2,5) et au point de flétrissement (pF4,2).

[carrée noir] [theta] à pF2,5 : 0,075 cm³/cm³, [theta] à pF4,2 : 0,025 cm³/cm³ ; [carrée blanc] [theta] à pF2,5 : 0,20 cm³/cm³,[theta] à pF4,2 : 0,10 cm³/cm³ ; + [theta] à pF2,5 : 0,45 cm³/cm3, [theta] à pF4,2 : 0,20 cm³/cm³.

A titre d'illustration, cette relation a été représentée dans la figure III.10 pour trois types de sol qui diffèrent fortement du point de vue du taux d'humidité à la capacité au champ et de la disponibilité en eau. Pour une quantité donnée d'eau infiltrée (*I*), la profondeur d'humidification semble principalement être déterminée par le taux d'humidité à la capacité au champ ; une différence de disponibilité en eau à une même capacité au champ influence peu la profondeur d'humidification (figure III.11). Bien qu'il s'agisse d'une simplification de la réalité, il a été décidé de ne tenir compte que du taux d'humidité à la capacité au champ en tant que caractéristique déterminante pour le sol. Une analyse de toutes les combinaisons simulées pluviosité/type de sol, a permis d'établir une équation décrivant la relation entre

quantité d'eau infiltrée (*I*) et profondeur d'humidification du profil (pr_h), à savoir : $pr_h = a (I - 69)/1,15$ (équation II.6). Dans cette équation, a représente une variable qui est liée au taux d'humidité à la capacité au champ (figure II.5), résultant de l'analyse des simulations.

Figure III.11

Profondeur d'humidification du profil (pr_h par rapport à la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour deux types de sol avec 0,15 [carrée noir]--- [carrée noir]) et 0,30 cm³/cm³ ([triangle——[triangle]) de disponibilité en eau (taux d'humidité à pF2,5 moins le taux d'humidité à pF4,2), mais pour un taux d'humidité identique à la capacité au champ.

La figure III.12 représente la relation entre pr_h et *I* pour des sols de capacités au champ différentes : pour un sol sablonneux grossier avec une capacité au champ de 0,05 cm³/cm³, une infiltration de 250 mm est suffisante pour humidifier le sol à 2 m de profondeur, alors qu'il faut 1500 mm pour un sol argileux lourd (taux d'humidité à la capacité au champ 0,45 cm³/cm³).

Figure III.12

Rapport entre la profondeur d'humidification du profil (pr_h) et la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour des types de sol avec différents taux d'humidité (cm²/cm³) à la capacité au champ.
Cf. équation II.6.

Effets de la répartition et de l'importance des pluies

Pour une même pluviosité annuelle, la répartition des pluies (nombre et importance des précipitations) peut varier fortement. A titre d'illustration, le total du nombre de pluies a été réparti en quatre catégories pour certaines années parmi les 50 années utilisées (tableau III.4). Lors du calcul de la quantité d'eau infiltrée (*I*), une moyenne annuelle est utilisée pour le coefficient de ruissellement ou de concentration des écoulements. Il n'est ainsi pas tenu compte des effets de la répartition des pluies sur ces coefficients (équation II.1). III.2.2 a montré que le ruissellement en surface dépend de l'importance et de l'intensité des pluies, de la capacité d'infiltration du sol et du taux d'humidité du sol au début de la pluie : un grand nombre de pluies importantes groupées peuvent entraîner un ruissellement annuel plus important qu'un grand nombre de petites pluies réparties régulièrement dans le temps. La répartition de la pluviosité exerce également une influence sur l'évaporation du sol : en effet, l'évaporation du sol atteint la valeur potentielle pendant 1 à 3 jours après l'humidification du sol (en fonction du type de sol). C'est pourquoi l'infiltration sera minimale lorsque toutes les précipitations tombent en pluies de moins de 6 mm par jour.

En utilisant le modèle, les effets de la répartition des pluies sont pris en compte. Il en résulte la possibilité d'obtenir différentes quantités d'eau infiltrée pour une même pluviosité totale. Aussi, la quantité d'eau infiltrée annuelle (I_mo) calculée à l'aide du modèle, diffère de l'estimation grossière de *I* (équation II.1), qui est utilisée ailleurs dans ce manuel. Le rapport présenté entre *I* et la valeur moyenne

de I_{mo} (figure III.13) est décrite par

$$I = 1{,}16\, I_{mo} + 70 \qquad \text{(équation III.5)}$$

Tableau III.4
Nombre de pluies (total, < 6 mm, 6-15 mm, 16-30 mm et > 30 mm) de quelques années de pluviosité, utilisées lors des simulations.

pluviosité (mm)	nombre total de pluies	nombre de pluies par catégorie			
		< 6 mm	6-15 mm	16-30 mm	> 30 mm
213	17	8	4	3	2
213	36	24	9	2	1
216	23	12	7	2	2
431	49	22	21	5	1
433	39	18	10	8	3
444	48	27	11	6	4
546	37	10	15	8	4
549	42	15	15	8	4
556	48	18	19	8	3
851	54	12	17	22	3
853	41	10	13	9	9
865	33	1	10	10	12
1128	58	18	15	17	8
1129	40	12	12	9	7
1154	75	29	20	11	15

La figure III.13 démontre que, pour une valeur donnée de I, la valeur trouvée de I_{mo} peut être plus élevée ou plus basse de 70 mm. Cette différence entre I_{mo} et I peut être supposée maximum, car lors de la sélection d'années à pluviosité, ce sont les extrêmes qui sont retenus en matière de répartition des pluies. L'utilisation de I fait malheureusement négliger l'effet de la répartition de la pluviosité sur la quantité infiltrée d'eau (II.3.6.5), et l'erreur peut donc être de 70 mm au maximum. La figure III.14 représente l'effet de 70 mm d'eau infiltrée sur la profondeur d'humidification par rapport à la capacité au

champ. Il apparaît ainsi que, notamment sur les sols sablonneux, des différences de répartition de pluies peuvent engendrer de grandes différences de profondeur d'humidification du sol, et entraîner des conséquences importantes pour le rendement et la production d'azote (figure III.8).

Figure III.13
Quantité annuelle d'eau infiltrée (I) calculée selon l'équation I = P(1-R) en tant que fonction de la quantité annuelle d'eau infiltrée calculée à l'aide du modèle de simulation (I_{mo}), pour des années à pluviosité fortement variable du point de vue de la quantité et de la répartition.

Figure III.14
Effet d'une différence de 70 mm d'eau infiltrée sur la profondeur d'humidification du profil (pr_h) en tant que fonction du taux d'humidité à la capacité au champ (pF 2,5 ; H).

Détermination du taux d'humidité à pF 2,5 à partir de la texture

Dans la plupart des cas, les données de taux d'humidité des sols à pF 2,5 (capacité au champ) ne seront pas disponibles. Par contre, la texture du sol est souvent connue. Sur la base de données d'Odell *et al*. (1974) concernant des sols en Sierra Leone, Dijkerman (1975) a découvert un rapport positif entre le taux d'argile (< 2 µ) et le taux d'humidité au point de flétrissement, et un rapport négatif entre le taux de sable (50-2000 µ) et le taux d'humidité à la capacité au champ. Brouwers & Keita (1976) ont établi la texture et les taux d'humidité au point de flétrissement et à la capacité au champ pour un grand nombre de profils du plateau mandingue au Mali. Les données ont été analysées suivant une méthode identique à celle de Dijkerman (1975 ; figures III.15 et figure III.16. Les lignes de régression établies sur la base des données en provenance de Sierra Leone et du Mali concordent pour le rapport taux d'argile/taux d'humidité au point de flétrissement : $y = 0{,}002 + 0{,}0041\ x_1$ et $y = 0{,}007 + 0{,}0039\ x_1$ pour respectivement Brouwers & Keita et Dijkerman (y = taux d'humidité en g/g au point de flétrissement, x_1 = taux d'argile en %). Pour ce qui concerne le rapport taux de sable/taux d'humidité à la capacité au champ, la ligne de régression basée sur les données du Mali se situe environ 3 pour-cent en-dessous de celle basée sur les données en provenance de Sierra Leone, mais l'inclinaison est identique : $y = 0{,}35 - 0{,}0035\ x_2$ pour Brouwers & Keita et $y = 0{,}37 - 0{,}0035\ x_2$ pour Dijkerman (x_2 = taux de sable en %).

Dans le cas d'une utilisation des lignes de régression basées sur les données du Mali, il en résulte dans certains cas une disponibilité négative en eau. Ceci est le cas notamment lorsque le taux de limon (2-50 µ) est très bas. Il n'y a pas d'explication évidente aux différences constatées, et afin d'éviter le calcul de valeurs négatives pour la disponibilité en eau, le choix a porté sur les lignes de régression établies par Dijkerman (1975).

Le taux d'humidité calculé ainsi est exprimé en pourcentages de poids. Ici le travail est effectué avec des pourcentages de volume, afin de faire apparaître plus directement le rapport entre le taux et la profondeur d'humidification du sol ; il faut donc ensuite convertir les valeurs obtenues par le calcul. Le poids volumétrique des sols dans les pays sahéliens varie entre 0,7 et 1,9 g/cm³. Une valeur moyenne

raisonnable est 1,4 g/cm³ (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 64). On suggère utiliser cette valeur, en l'absence de valeurs mesurées. Cette valeur a également été utilisée pour établir l'équation permettant l'estimation du taux humidité à la capacité au champ sur la base du taux de sable du sol (équation II.5). La base a été constituée par la ligne de régression de Dijkerman applicable au cas présent : $y = 0,37 - 0,0035\ x_2$. Dans cette équation, y est appelé *H*, et x_2 est appelé TS, alors que le terme de droite est multiplié par le poids volumétrique moyen du sol.

Figure III.15

Rapport entre le taux d'humidité du sol (fraction du poids) au point de flétrissement et le pourcentage d'argile pour des sols en Sierra Leone (-----), en comparaison avec ce rapport pour quelques sols au Mali (. ——·).

Selon Dijkerman, 1975 et Brouwers & Keita, 1976 ; les observations encerclées n'ont pas été prises en considération lors de l'analyse de régression.

Figure III.16

Rapport entre le taux d'humidité du sol (fraction du poids) à la capacité au champ et le pourcentage de sable pour des sols en Sierra Leone (-----), en comparaison avec ce rapport pour quelques sols au Mali (. ——·).

Selon Dijkerman, 1975 et Brouwers & Keita, 1976 ; les observations encerclées n'ont pas été prises en considération lors de l'analyse de régression.

Pertes d'azote par lixiviation

Lors de la déduction du bilan d'azote dans une situation d'équilibre on a supposé qu'il n'y a pas des pertes d'azote par lixiviation. Cependant, on peut envisager des situations dans lesquelles de telles pertes ne seraient pas négligeables. L'importance de ces pertes d'azote dépend de la profondeur du sol, du taux d'azote de l'eau, de la capacité d'absorption de la végétation et de la quantité d'eau qui percole hors de la portée des racines.

On a supposé que la profondeur maximum des racines des espèces annuelles est de 2 m. L'eau qui percole au-delà n'est plus disponible pour l'absorption, pas plus que l'azote qui s'y trouve dissous. L'azote sous forme minérale est très mobile, c'est pourquoi le problème se posera surtout en début de saison. Bien que la végétation puisse absorber rapidement et en grandes quantités l'azote minéral, les espèces annuelles doivent, à ce moment encore, constituer leur système racinaire, alors que la minéralisation de l'azote dans le sol a déjà débuté. Dans le cas des espèces pérennes et ligneuses, l'absorption d'azote peut débuter plus tôt, grâce à la présence d'un système racinaire permanent, qui fonctionne comme une sorte de filet de ramassage des éléments nutritifs. C'est pourquoi on suppose, de manière assez optimiste, que les pertes d'azote dues à la lixiviation ne jouent un rôle que dans le cas des végétations annuelles.

La figure III.12 montre que les pertes d'eau hors du profil interviennent pour plus de 300 mm d'eau infiltrée sur les sols légers (taux d'humidité à la capacité au champ 0,05 cm³/cm³) et pour plus de 1500 mm sur les sols lourds (taux d'humidité à la capacité au champ 0,45 cm³/cm³).

A l'aide du modèle, les pertes d'eau hors du profil (*Pe* en mm/an) ont été calculées pour chaque combinaison année de pluviosité/type de sol, lesquelles ont été mentionnées précédemment. A titre d'illustration, la figure III.17 représente ce rapport pour trois types de sol. Il ressort de cette figure que pour chaque valeur de taux d'humidification à la capacité au champ, le rapport entre *I* (mm/an) et *Pe* peut être représentée par une droite. La distance entre les droites est proportionnelle à la différence en taux d'humidité à la capacité au champ. La combinaison des équations décrivant ces droites, aboutit à une équation générale (figure III.18) :

$$Pe = 0{,}69\ I - 1605\ H - 118 \quad \text{(équation III.6)}$$

dans laquelle
Pe = pertes d'eau hors du profil pour une profondeur de sol définie à 200 cm (mm/an) ;
I = quantité d'eau infiltrée, calculée à l'aide de l'équation II.1 (mm/an) ;
H = taux d'humidité à la capacité au champ (cm^3/cm^3).

Figure III.17
Pertes d'eau simulées (Pe) hors d'un profil de 2 m de profondeur en tant que fonction de la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour 3 types de sol variant du point de vue du taux d'humidité à la capacité au champ et le point de flétrissement.
[carrée noir] [theta] à pF2,5 : 0,075 cm^3/cm^3, [theta] à pF4,2 : 0,025 cm^3/cm^3 ; [carrée blanc] [theta] à pF2,5 : 0,20 cm^3/cm^3, [theta] pF4,2 : 0,10 cm^3/cm^3 ; + [theta] à pF2,5 : 0,30 cm^3/cm^3,[theta] à pF4,2 : 0,10 cm^3/cm^3.

Figure III.18
Pertes d'eau simulées (Pe) hors d'un profil de 2 m de profondeur en tant que fonction de la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour des types de sol variant du point de vue du taux d'humidité à la capacité au champ (cm^3/cm^3).

Il se produit également des situations dans lesquelles la profondeur du sol est de moins de 2 m, notamment sur les plateaux latéritiques et sur grès. L'eau s'écoule alors par le bas du profil à travers des crevasses dans la roche mère, pour s'acheminer vers des réservoirs d'eau situés plus profondément, ou encore s'écoule latéralement sur la roche mère. Dans les deux cas, l'azote dissous dans l'eau qui s'écoule est perdu pour la végétation sur place. Tout comme pour le cas d'une profondeur de sol de 2 m, le modèle permet le calcul des pertes d'eau dans des sols moins profonds. Ce calcul a été effectué pour les 50 années sélectionnées, les types de sols étant caractérisés selon leur taux d'humidité à la capacité au champ, et pour des profondeurs de sol de 150, 100, 75, 50 et 25 cm. Le rapport calculé pour les différents types de sol, entre le taux d'humidité à la capacité au champ, la quantité d'eau infiltrée (*I*) et les pertes d'eau par le bas du profil (*Pe*), est représenté en trois dimensions dans la figure III.19 ; sur cette figure apparaît également ce même rapport pour une profondeur du sol de 200 cm. La figure est décrite par l'équation introduite dans II.2.2.4 et dont l'équation III.6 est une dérivée pour *pr* = 200 cm :
$Pe = 0{,}69\ I - 45\ H - 0{,}22\ pr - 7{,}8\ (H \times pr) - 74$ (équation II.4).

Figure III.19
Rapport tridimensionnel entre la quantité simulée de pertes d'eau hors du profil (Pe), la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour les types de sols variant en taux d'humidité pour la capacité au champ (H), et une profondeur variable du profil (pr).

En principe, la valeur limite de *I*, pour laquelle un sol de profondeur déterminée ne présente précisément pas de percolation, devrait pouvoir être déterminée à l'aide de l'équation de calcul de profondeur d'humidification du sol (équation II.6). Une certaine discordance risque cependant de se présenter entre :
- la valeur de *I* obtenue en supposant $Pe = 0$ dans l'équation II.4 pour une profondeur de sol donnée, et
- le *I* résultant de l'équation II.6 avec une même profondeur pour pr_h. Ces équations résultent en effet d'analyses de régression non liées entre elles.

Les équations mentionnées offrent la possibilité de quantifier les pertes d'eau hors du profil en fonction de la quantité d'eau infiltrée, du taux d'humidité à la capacité au champ et de la profondeur du sol. Il apparaît, une fois encore, que la variabilité résultant de la répartition de la pluie a disparu par le biais de l'utilisation des valeurs annuelles moyennes pour la pluviosité et pour le coefficient de ruissellement ou de concentration des écoulements. Tout comme pour l'évaluation de la profondeur d'humidification, il en résultera un écart maximum de 70 mm d'eau infiltrée par comparaison au *I* calculé.

Il est difficile de quantifier la quantité d'azote contenue dans l'eau qui s'est écoulée. Le taux d'azote de cette eau variera fortement en fonction de la présence et de l'importance relative des processus de minéralisation/immobilisation, par rapport au moment d'apparition de ces pertes d'eau hors du profil et selon la capacité d'absorption de la végétation. Il n'existe pas de modèles décrivant ce phénomène avec suffisamment de précision. C'est pourquoi, on a supposé de façon arbitraire que la perte d'azote par mm d'eau écoulée est égale à la quantité d'azote qui entre dans le système par mm d'eau infiltrée. Sur cette base, la correction peut être effectuée simplement en déduisant de *I* la quantité d'eau écoulée, avant d'utiliser les équations III.1 et III.4. C'est ainsi qu'ont été établies les équations II.15 et II.7. Mais lors du calcul de la production de la strate herbacée, les pertes par percolation ne sont pas prises en compte lorsque le recouvrement par les espèces ligneuses est supérieur à 15 % et/ou celui des graminées pérennes supérieur à 50 % (II.2.2.4 ; II.3.4).

Pour les régions à forte concentration des écoulements, le risque de surestimer la disponibilité en azote apparaît alors, car il y a non seulement pertes supplémentaires d'eau par évaporation à partir des eaux stagnantes, mais également pertes d'azote par dénitrification (anaérobie).

III.2.4. Coefficient de ruissellement de parcelle et de bassin

De la parcelle au bassin

Le coefficient de ruissellement peut être calculé aussi bien pour des zones réduites (parcelles) que pour des zones importantes (par exemple bassins). Dans l'agriculture le coefficient de ruissellement (R) est mesuré pour des zones limitées, tels par exemple les champs ou les parcelles de pâturage. Dans la

pratique, les parcelles sur lesquelles les mesures sont effectuées dépassent rarement quelques mètres carrés. Le coefficient de ruissellement est appliqué sur des zones de l'ordre de grandeur d'hectares, afin de déterminer le bilan hydrique (notamment la disponibilité en eau) pour les plantes et la végétation.

Les études hydrologiques comprennent non seulement le calcul du coefficient de ruissellement déjà mentionné, mais également le calcul du coefficient de ruissellement (K_r) des parties ou de la totalité d'un bassin. Il s'agit de zones de l'ordre de grandeur de nombreux kilomètres carrés. Ce coefficient de ruissellement représente le débit d'un cours d'eau, exprimé en tant que fraction de la pluviosité annuelle dans le bassin tout entier. Il a surtout son importance dans l'optique de projets tels que les travaux d'irrigation et la constitution de réserves d'eau.

En principe, le coefficient de ruissellement diminue dans l'ordre suivant : parcelle, unité de paysage, bassin, car l'eau en déplacement est retenue prisonnière dans des micro et macro-dépressions et est soumise à l'évaporation.

Le coefficient de ruissellement d'un bassin dépend donc de l'étendue du bassin. Lorsqu'un bassin important est subdivisé en de nombreux petits bassins, les coefficients de ruissellement de ces sous-bassins s'approcheront finalement de la valeur numérique du niveau de la parcelle.

Dans ce manuel, les deux coefficients de ruissellement sont utilisés pour le calcul de la disponibilité en eau pour la végétation. Le paragraphe suivant traitera plus en détail du coefficient de ruissellement au niveau de la parcelle. Ensuite sera exposé comment (en fonction de l'échelle de travail) le coefficient de ruissellement d'un bassin peut être utilisé pour le calcul de la quantité d'eau disponible pour la végétation.

Coefficient de ruissellement au niveau de la parcelle

Au niveau de la parcelle, le ruissellement pour une pluie individuelle (R_i) est déterminé par la durée et l'intensité (la grandeur totale sous forme simplifiée) de la pluie elle-même (P_i), par la quantité maximum d'eau qui peut s'infiltrer dans le sol ($I_{i)}$ pendant la pluie, et par la capacité de stockage de la surface du sol (CS ; Snijders, 1982) :

$$R_i = P_i - I_i - CS \qquad \text{(équation III.7)}$$

Lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, il y aura formation de flaques d'eau. Ces flaques d'eau ont une profondeur moyenne (mm), qui dépend du micro-relief de la surface du sol : la capacité de stockage de la superficie du sol ou valeur CS . Dans le cas de terrains situés sur des versants, l'eau ruissellera dès que la quantité d'eau stagnante dépasse la capacité de stockage de la surface du sol. Celle-ci augmente avec la rugosité de la surface du sol, le nombre et la profondeur des microdépressions et la quantité de végétation et/ou des résidus de la végétation. Le travail du sol entraîne

une capacité accrue d'infiltration (cassure de la croûte) et une plus grande valeur *CS* due à la formation de mottes. Cet effet n'est que temporaire, car les mottes s'émiettent au cours de la saison des pluies. Ce phénomène se produit plus rapidement sur les sols sablonneux que sur les sols limoneux ou argileux (Hoogmoed & Stroosnijder, 1984 et Stroosnijder & Hoogmoed, 1984). Sur le terrain, la valeur *CS* peut être estimée sur la base de la profondeur moyenne (en mm) des flaques d'eau après une pluie ayant entraîné un ruissellement. Le tableau III.5 indique les valeurs moyennes pour quelques types de sol. Pour les sols sablonneux, la valeur *CS* peut être de 20 à 30 mm lors d'une culture en billons. Pour des données plus précises et une méthode de détermination plus exacte, on peut se référer au livre récent de Casenave & Valentin (1990).

La capacité d'infiltration qui détermine la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol constitue une caractéristique du sol, mais dépend également de l'état d'humidité du sol au début d'une pluie. La vitesse d'infiltration diminue rapidement pendant les premières minutes de la pluie et atteint ensuite un niveau pratiquement constant (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 139). La vitesse d'infiltration d'un sol est déterminée par la capacité d'absorption et la pesanteur. La pesanteur a seulement de l'importance lorsque la pluie dure longtemps et qu'en surface le sol est pratiquement saturé d'eau. Pour les pluies plus courtes (moins de 30 min), il existe un rapport pratiquement rectiligne entre la quantité d'eau infiltrée (*I* en mm) et la racine carrée du temps écoulé depuis le début de la pluie ([racine carrée]t; t en min). L'inclinaison de la droite est définie comme la capacité d'absorption du sol (*S* en mm/min$^{1/2}$; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 136). Dans les situations où l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration, la quantité d'eau infiltrée (I_i en mm) est égale à la valeur intégrée de la capacité d'infiltration. La quantité d'eau infiltrée (I_i) peut alors être décrite à l'aide de la capacité d'absorption du sol (*S*) et de la durée de la pluie (t ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 133-140) :

$$I_i = S \times [\text{racine carrée}]\, t \qquad \text{(équation III.8)}$$

Tableau III.5
Valeurs moyennes pour la capacité de stockage (CS) de la surface du sol et capacité d'infiltration (S) pour plusieurs types de sol.

	CS (mm)	*S* (mm/min ½)
sols limoneux avec croûte	1	1
sols argileux	1-2	1
sols limono-sablonneux	2	1
sols sablonneux (sable fin)	2	2-3
sols sablonneux (sable grossier)	2-5	3-5

La capacité d'absorption du sol peut être mesurée sur le terrain, par l'utilisation d'un simulateur de pluie permettant de varier la durée et l'intensité de la pluie. Le tableau III.5 indique des valeurs type moyennes pour quelques types de sol sur une saison de croissance.

Comme on l'a déjà mentionné, l'utilisation de la totalité de la pluie P_i constitue une simplification, car la durée et l'intensité de la précipitation déterminent principalement le ruissellement. Lors d'une grosse pluie et/ou d'une forte intensité, le risque de ruissellement est important, alors que pour une petite pluie et/ou une faible intensité, il n'y a généralement pas de ruissellement. Bien que les services météorologiques nationaux et AGRHYMET diffusent de plus en plus d'informations sur la pluie, les chiffres détaillés mentionnant outre les totaux journaliers, des informations sur l'importance d'une pluie donnée, sa durée et son intensité, ne seront pas toujours disponibles. Néanmoins, il est possible d'estimer le ruissellement à partir des seuls totaux journaliers, pour des valeurs *S* et *CS* variables (Snijders, 1982). La méthode à suivre est illustrée à l'aide d'un exemple.

Pour le premier exemple, la sélection a porté sur quatre années sèches (p10%) et quatre années moyennes (p50%) d'une demi-douzaine de stations pluviométriques au Mali : trois dans le nord (Saraféré, Goundam et Kabara) et trois dans le sud (Djenné, Niono et Sokolo) du Sahel. Les pluies individuelles ont été réparties en trois catégories : pluies < 10 mm, pluies entre 10 et 20 mm et pluies > 20 mm. On a supposé que les totaux journaliers représentent une seule pluie. On a calculé la quantité totale de pluie dans chaque catégorie de grandeur et la fraction du total annuel. Les valeurs moyennes par station et par zone climatique sont présentées dans le tableau III.6 . Il apparaît ainsi que pendant les années moyennes, la fraction de la pluviosité totale par catégorie de grandeur diverge à peine entre le nord et le sud du Sahel. Pendant les années sèches, la différence est plus significative. A l'aide de la quantité totale de pluie dans une catégorie, et du nombre de pluies dans cette catégorie, on a calculé la grandeur moyenne des précipitations par catégorie pour toutes les années et ensuite par station et par zone (tableau III.7) : cette moyenne ne semble pas diverger fortement entre le nord et le sud du Sahel et entre les années sèches et humides.

Tableau III.6
Pluviosité annuelle pendant des années sèches (p10%) et moyennes (p50%) ; répartition des pluies individuelles (P_i) en trois catégories (CIEH, 1965) pour des stations pluviométriques dans le nord et le sud du Sahel, sur la base de 8 années d'observation par station (4 années sèches et 4 années moyennes).

	années sèches	années moyennes	Pi < 10 mm	$10 \leq P_i \leq 20$ mm	P_i > 20 mm

	p10% (mm)	pluviosité moyenne de 4 ans typiques (mm)	p50% (mm)	pluviosité moyenne de 4 ans typiques (mm)		p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%
stations pluviométriques											
Kabara	135	138	220	215	(mm)	49,3	58,4	44,5	62,1	44,4	94,6
					(%)	35,7	27,1	32,2	28,9	32,1	44,0
Goundam	160	159	260	266	(mm)	47,7	55,8	59,9	66,5	50,9	144,0
					(%)	30,1	20,9	37,8	25,0	32,1	54,1
Saraféré	200	204	310	303	(mm)	40,5	57,7	74,9	65,9	88,3	179,8
					(%)	19,9	19,0	36,8	21,7	43,4	59,2
moyenne du Nord		167		262	(mm)	46	57	60	65	61	140
					(%)	28	22	36	25	37	52
Sokolo	390	402	550	557	(mm)	86,9	106,3	123,1	133,5	192,5	316,9
					(%)	21,6	19,1	30,6	24,0	47,8	56,9
Niono	450	387	580	574	(mm)	96,7	107,3	105,7	176,9	184,6	289,6
					(%)	25,0	18,7	27,3	30,8	47,7	50,5
Djenné	420	462	610	611	(mm)	106,2	106,2	94,6	139,3	260,9	367,8
					(%)	23,0	17,4	20,5	22,3	56,5	60,2
moyenne du Sud		417		581	(mm)	97	107	108	150	213	325
					(%)	23	18	26	26	52	56

Tableau III.7
Pluviosité caractérisée selon le nombre de pluies (n) et l'importance moyenne des pluies (mm). Pluies réparties en trois catégories pour les années sèches (p10%) et moyennes (p50%), sur la base des mêmes observations que dans le tableau III.6.

	$P_i < 10$ mm				$10 \leq Pi \leq 20$ mm				$Pi > 20$ mm			
	n		mm		n		mm		n		mm	
	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%	p10%	p50%
stations pluviométriques												

Kabara moyenne	14	17	3,6	3,4	3	4	14,8	14,6	1	3	29,4	29,1
Goundam moyenne	11	12	4,4	4,6	4	5	16,0	14,0	2	4	29,1	33,9
Saraféré moyenne	9	12	4,5	4,7	5	4	15,0	15,5	3	5	29,4	37,7
moyenne du Nord	11	14	4,1	4,2	4	5	15,8	14,7	2	4	29,4	32,2
Sokolo moyenne	18	23	4,9	4,2	7	10	14,5	14,6	7	10	30,4	33,0
Niono moyenne	26	23	3,7	4,1	7	12	14,6	14,2	6	9	29,5	32,2
Djenné moyenne	23	22	4,6	4,9	7	9	14,0	15,1	8	11	30,7	34,2
moyenne du Sud	22	23	4,3	4,4	7	10	14,5	14,6	7	10	30,4	33,0

En plus de la grandeur moyenne d'une pluie dans une catégorie, l'intensité moyenne de cette pluie a son importance, car elle permet de calculer la durée d'une précipitation. Pendant trois années consécutives, la durée et l'intensité des pluies individuelles ont été mesurées à Niono à l'aide de pluviomètres enregistreurs (Stroosnijder & Hoogmoed, 1984). Pour les trois catégories de grandeur distinguées, les pluies ont été classées selon leur intensité, en quatre groupes numériquement semblables, après quoi l'intensité moyenne par groupe a été calculée (tableau III.8).

La durée par pluie a été calculée à partir de la grandeur moyenne par pluie et par catégorie dans le nord et le sud du Sahel (tableau III.7), et à partir de la classification des intensités par catégorie à Niono (tableau III.8). Les équations III.8 et III.7 permettent à présent de calculer le ruissellement pour chacune des pluies : ceci a été fait pour trois valeurs de *S* et *CS* (tableau III.9). Finalement, à l'aide du nombre de pluies, de la grandeur moyenne des pluies par catégorie et de leur ruissellement calculé, le ruissellement annuel peut être calculé (tableau III.10a-c). Ce tableau peut être étendu selon les besoins à d'autres valeurs de *S* et de *CS*.

Tableau III.8
Intensité pluvieuse à Niono (au cours de trois années successives, et leur moyennes), selon les catégories d'importance des pluies. Dans chaque catégorie, les pluies ont été classées suivant leur intensité, et réparties en quatre catégories d'intensité croissante de nombre égal, après quoi l'intensité moyenne par catégorie a été calculée.

	année	intensité (mm/h)			
catégorie de pluie		1*	2*	3*	4*

*P*i < 10 mm	1977	3	8	19	33
	1978	4	8	18	32
	1979	3	7	17	31
	moyenne	3	8	18	32
10 ≤ *P*i ≤ 20 mm	1977	5	24	48	71
	1978	4	13	32	51
	1979	5	16	31	61
	moyenne	5	18	37	61
*P*i > 20 mm	1977	8	32	72	129
	1978	5	26	45	78
	1979	8	43	69	141
	moyenne	7	34	62	116

* 1 « 4 = 25 % des pluies à plus faible intensité vers 25 % à intensité maximum

Tableau III.9
Ruissellement par pluie (R_i) pour quatre catégories d'intensité et trois catégories d'importance, par rapport à la capacité de stockage de la surface du sol (CS en mm) et la capacité d'absorption (S en mm $min^{½}$), parallèlement à la durée par pluie et l'infiltration théorique maximum.*

	grandeur moyenne (mm)	intensité (mm/h)	durée par pluie (min)	infiltration maximale (mm)			*R*i (mm) *CS* = 0 mm			*R*i (mm) *CS* = 2 mm			*R*i (mm) *CS* = 5 mm		
				S=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S*=2	*S*=3
catégorie de pluies															
*P*i < 10 mm	4,3	3	86	9	19	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		8	32	6	11	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		18	14	4	7	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		32	8	3	6	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ≤ *P*i ≤ 20 mm	14,8	5	178	13	27	40	2	0	0	0	0	0	0	0	0
		18	49	7	14	21	8	1	0	6	0	0	3	0	0
		37	24	5	10	15	10	5	0	8	3	0	5	0	0

		61	15	4	8	12	11	7	3	9	5	1	6	2	0
*P*i > 20 mm	31,3	7	268	16	33	49	16	0	0	13	0	0	10	0	0
		34	55	7	15	22	25	17	10	22	14	7	19	11	4
		62	30	5	11	16	27	21	16	24	18	13	21	15	10
		116	16	4	8	12	28	24	20	25	21	17	22	18	14

* équation III.8.

Tableau III.10
Ruissellement annuel (R_{ann}) par catégorie de pluie (mm) et son total (% de la pluviosité) pour différentes valeurs de la capacité d'absorption (S en mm $min^{½}$) et de la capacité de stockage de la surface du sol (CS en mm) et caractéristiques pluviométriques par zone et par situation climatique.

	P_{ann}		pluie moyenne (mm)	nombre de pluies	R_{ann} *CS* = 0			R_{ann} *CS* = 2			R_{ann} *CS* = 5		
	mm	%P			*S*=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S* =2	*S*=3
catégorie de pluies													
a : pendant les années moyennes dans le nord et le sud du Sahel													
P_i < 10 mm	82,0	19,5	4,3	19,0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ≤ P_i ≤ 20 mm	107,3	25,5	14,8	7,3	57	24	5	42	15	2	26	4	0
P_i > 20 mm	231,1	55,0	31,3	7,4	178	115	85	155	98	68	133	81	52
total (mm)	420,6	100,0			240	139	90	197	113	70	159	85	52
R_{ann} (%)					57	33	21	47	27	17	38	20	12
b : pendant les années sèches dans le nord du Sahel													
P_i < 10 mm	45,8	27,5	4,3	10,7	3	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ≤ P_i ≤ 20 mm	59,8	35,8	14,8	4,0	31	13	3	23	8	1	14	2	0
P_i > 20 mm	61,2	36,7	31,3	2,0	48	31	23	42	27	19	36	22	14
total (mm)	166,8	100,0			82	44	26	65	35	20	50	24	14
R_{ann} (%)					49	26	16	39	21	12	30	14	8
c : pendant les années sèches dans le sud du Sahel													

P_i< 10 mm	96,6	23,2	4,3	22,5	6	0	0	0	0	0	0	0	0
10 ≤ P_i ≤ 20 mm	107,8	25,8	14,8	7,3	57	24	5	42	15	2	26	4	0
P_i > 20 mm	212,7	51,9	31,3	6,8	175	113	84	143	90	63	122	75	48
total (mm)	417,0	100,0			238	137	89	185	105	65	148	79	48
R_{ann} (%)					57	33	21	44	25	16	35	19	12

L'exemple précité fournit une estimation raisonnable du coefficient de ruissellement, en moyenne sur un nombre d'années sèches et d'années normales. La pluviosité d'une année donnée peut cependant diverger fortement du point de vue du nombre de pluies, de leur classification sur les trois catégories ainsi que de leur importance moyenne par catégorie. L'exemple suivant démontre que ces divergences peuvent avoir une influence importante sur le coefficient de ruissellement. Pour la station de Nara au Mali, l'année 1964 a été choisie comme exemple (CIEH, 1974). La pluviosité totale de l'année en question ne diverge pas de la pluviosité moyenne pendant les années normales (431 mm), mais le nombre de pluies dans les catégories faible et moyenne est supérieur à la moyenne, tandis que le nombre de pluies dans la catégorie supérieure est inférieur à la moyenne. De plus, la grandeur moyenne des pluies diverge légèrement dans les trois catégories (tableau III.11). Le ruissellement dans cette année spécifique s'écarte par conséquent fortement de la moyenne (tableau III.12).

Lorsque, dans une évaluation semi-détaillée, il apparaît que la répartition des pluies diverge fortement de celle de l'année de mesure, la méthode décrite permet de corriger le coefficient de ruissellement (II.3.6.3, question 4).

Tableau III.11
Comparaison entre la pluviosité à Nara en 1964 et celle d'une année moyenne dans le Sahel.*

	répartition (%)		importance de la pluie (mm)		nombre de pluies (n)	
	Nara	Sahel	Nara	Sahel	Nara	Sahel
catégorie de pluie (*P*i)						
< 10 mm	24	19,5	3,5	4,3	30	19,0
10-20 mm	47	25,5	13,5	14,8	15	7,3
> 20 mm	29	55,0	30,8	31,3	4	7,4

* selon tableau III.10a.

Tableau III.12

Comparaison entre le ruissellement (R en %) à différentes capacités de stockage de la surface du sol (CS en mm) et différentes capacités d'absorption (S en mm min½) à Nara en 1964 et pendant une année moyenne au Sahel.

	CS = 0			*CS* = 2			*CS* = 5		
	S=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S*=2	*S*=3	*S*=1	*S*=2	*S*=3
R : Nara	43	22	11	34	17	8	23	11	6
Sahel	57	33	21	47	27	17	38	20	12

* selon tableau III.10a.

Coefficient de ruissellement d'un bassin

Dans le cas des estimations semi-détaillée et détaillée, chaque unité de paysage est subdivisée en parties où l'eau ruisselle et en parties où il y a concentration des écoulements. Pour le calcul de la disponibilité en eau pour la végétation, aux endroits où l'eau ruisselle, c'est le coefficient R qui est utilisé, si nécessaire corrigé pour les pertes en eau par le bas du profil (*Pe*). Le calcul de la disponibilité en eau pour la végétation sur les parties où il y a concentration des écoulements est plus complexe. La quantité d'eau qui se concentre dépend du coefficient de ruissellement R et de la surface des aires qui fournissent l'eau. Par ailleurs, une partie des écoulements risque de quitter l'unité par l'intermédiaire des cours d'eau et ne doit donc pas être incluse dans le bilan hydrique de l'unité. Pour déterminer la quantité d'eau qui quitte l'unité, on peut utiliser le coefficient de ruissellement (K_r) du bassin dans lequel l'unité est située.

K_r dépend de la capacité de stockage du bassin en question et de la pluviosité.

La capacité de stockage d'une zone est liée à de nombreux facteurs (Rodier & Aurray, 1965 ; Puech & Chabi-Gonni, 1984). D'une manière générale, un bassin est hétérogène. Il se compose de différentes unités de paysage, qui en plus de différences dans R, présentent également des différences de capacité de stockage de l'eau. Ceci concerne aussi bien la capacité de stockage de la surface (voir niveau de la parcelle), la déclivité de la surface que la capacité de stockage du sol. La capacité de stockage du sol est liée à la texture et à la profondeur. La présence d'unités (ou parties d'unités) à concentration des écoulements (valeur négative de R), telles les vallées dunaires et les mares, influence fortement la capacité de stockage.

Lorsque les pluies dépassent le pouvoir d'absorption du bassin, l'eau quittera l'aire par les cours d'eau. Un exemple du rapport entre la pluviosité et le coefficient de ruissellement d'un bassin est fourni par IWACO (1983). Il s'agit de quatre bassins dans le Burkina Faso, de superficie a peu près identique (10.000 km2). Ces aires font partie de l'ensemble détritique et divergeront peu du point de vue de la capacité de stockage. Par contre, ces régions sont situées dans différentes zones pluviométriques. Le rapport entre le coefficient de ruissellement (K_r) et la pluviosité annuelle (*P* en mm) est linéaire (K_r =

0,023 *P* - 11,7). Le coefficient de ruissellement de ces grands bassins est faible : 0,02 pour 600 mm de pluviosité jusqu'à 0,08 pour 850 mm de pluviosité.

On a rappelé auparavant que le coefficient de ruissellement dépend également de l'étendue du bassin étudié. Albergel & Bernard (1984) en donnent un exemple. Il s'agit ici de parties des bassins déjà cités, situés au Burkina Faso, d'une superficie de 12 km2. Les auteurs ont mesuré un coefficient de ruissellement de 0,09 et 0,175 pendant deux années successives. Ils citent d'autres chercheurs qui ont mesuré au cours des années 1963, 1964 et 1965 dans le même bassin, des coefficients de ruissellement de 0,09, de 0,19 et de 0,085 successivement. Les variations de pluviosité pendant ces années se situent dans le même ordre de grandeur que pour l'exemple précité (IWACO, 1983), alors que les coefficients de ruissellement d'aires plus petites sont plus élevés.

Utilisation de K_r

Lors de l'estimation globale d'une vaste région (II.2.2), les pertes d'eau hors de cette région peuvent être négligées : la valeur K_r est alors très faible. Pour les régions plus petites et pour une estimation plus détaillée (II.2.3 et II.2.4), ces pertes ne peuvent plus être négligées et il serait préférable de disposer de mesures de coefficients de ruissellement pour la région faisant l'objet de l'évaluation. La quantité d'eau qui se concentre dans les parties du bassin à concentration des écoulements, peut alors être diminuée de la quantité d'eau calculée à l'aide de la valeur Kr, avant que ne s'effectue le calcul de *I* pour les parties avec concentration des écoulements.

Dans de nombreux cas, les valeurs K_r ne seront pas disponibles. Sur la base des données citées précédemment et d'autres données venant des ouvrages spécialisés, une estimation grossière a été faite des coefficients de ruissellement. Pour les bassins d'une superficie de 10.000 km² ou plus et pour une pluviosité de moins de 500 mm, les coefficients de ruissellement peuvent être supposés négligeables. Au-delà de 500 mm, le coefficient de ruissellement des bassins de l'ensemble détritique s'élèvera environ à 0,15 pour 1200 mm. Le coefficient de ruissellement des bassins dans l'ensemble éolien pourra encore être négligé pour une pluviosité plus forte : 0,01 a été enregistré au Burkina Faso pour une pluviosité de 600 à 800 mm. Lors d'un agrandissement de l'échelle, les coefficients de ruissellement des bassins se rapprocheront finalement des coefficients de ruissellement au niveau des parcelles (R). A titre d'indication, les coefficients de ruissellement des aires de 100 km² situées dans l'ensemble détritique pourront encore être négligés pour une pluviosité inférieure à 400 mm. Au delà de 400 mm, ils peuvent s'élever jusqu'à 0,35 à 0,40 pour une pluviosité de 1200 mm.

Les unités retenues lors de l'évaluation (semi-)détaillée sont généralement encore beaucoup plus petites, et même pour les unités à substrat sablonneux dans le nord du Sahel, les pertes d'eau hors de l'unité ne seront pas toujours négligeables. Les méthodes permettant au niveau des parcelles de déduire K_r à partir du ruissellement (R) n'étant pas connues, la recherche s'est orientée vers une relation théorique. On a supposé que les pertes constituent une fraction de l'eau de ruissellement. Cette fraction se calcule en divisant le périmètre d'une unité par la somme des périmètres de toutes les sous-unités avec

concentration des écoulements, augmentée du périmètre extérieur. Bien que la forme et le nombre de ces sous-unités (vallées dunaires et dépressions) influencent la fraction de l'eau de ruissellement récoltée (et ne sort donc pas de l'unité par la limite extérieure), ces facteurs ont été négligés pour ne pas suggérer une précision irréelle. Seule la somme des superficies des sous-unités a été prise en compte, exprimée en tant que fraction de la superficie totale de l'unité. Le rapport déduit ainsi entre R et K_r est représenté dans le tableau II.13.

Le caractère utilitaire de ce rapport semble raisonnable compte tenu des valeurs de K_r en comparaison avec celles des bassins. Le K_r des bassins peut être considéré comme une seconde ou troisième déduction de R, alors que les unités distinguées dans ce manuel, peuvent être subdivisées en deux catégories, avec pertes d'eau et avec récolte d'eau. Le K_r moyen de la première catégorie peut être utilisé en tant que R dans le tableau II.13, et la somme des superficies des unités de la seconde catégorie peut être considérée comme la superficie de la partie du bassin qui subit la concentration des écoulements. Les valeurs K_r relevées à nouveau dans le tableau sont alors conformes à l'ordre de grandeur correspondant à celles des bassins.

III.2.5. Taux d'azote de la strate herbacée

Une évaluation qui se base notamment sur une estimation théorique de la production herbacée, se doit d'être complétée par une estimation de la qualité de l'herbage. C'est pourquoi ce manuel se concentre sur le taux d'azote. Un rapport a été constaté entre le taux d'azote à la fin de la saison de croissance et la pluviosité moyenne, le ruissellement ayant été pris en compte. Ce rapport est basé sur les observations effectuées pendant 4 ans sur le transect malien, déjà cité à plusieurs reprises (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 319-322). Ces observations ont été résumées dans la figure I.12.

Le rapport entre pluviosité et taux d'azote pour trois niveaux de ruissellement est présenté par la figure II.3. Cette figure a été constituée sur la base des hypothèses suivantes :
- La biomasse de la strate herbacée est constituée de trois composants : légumineuses, autres espèces C_3 et C_4. A la fin de la saison de croissance, la fraction de légumineuses dans la biomasse totale, sur la base du poids, est fixée à 5 %. La répartition entre les espèces C_3 et C_4 est rendue dépendante du ruissellement : lorsque le ruissellement est important, la fraction des espèces C3 est plus élevée que dans le cas contraire. Par contre, en présence d'une (grande) concentration des écoulements, la fraction des espèces C_4 est élevée (tableau I.10).
- Lorsque les précipitations dépassent 800 mm par an, la végétation se compose essentiellement d'espèces C_4 (Boudet, 1978).
- Le taux d'azote diffère pour les groupes végétaux distingués et augmente pour les légumineuses tout comme pour les espèces C_3 et C_4, au fur et à mesure de la réduction des pluies, donc du sud vers le nord (figure I.12) : le taux moyen d'azote de la biomasse est donc dépendant de sa composition et de la

pluviosité.

Il existe des situations dans lesquelles la composition floristique moyenne s'écarte en permanence de celle décrite ci-dessus (II.3.6.5). La figure I.12 permettra néanmoins d'estimer le taux d'azote à la fin de la saison de croissance (II.3.6.6).

III.2.6. Concurrence entre la strate herbacée et ligneuse

III.2.6.1. Théorie et pratique

Introduction

Bien que la strate herbacée, compte tenu de sa disponibilité et de sa qualité (notamment la digestibilité), ait une importance beaucoup plus grande pour l'élevage que les arbres et les arbustes, ces derniers ne doivent pas être négligés :
- le taux en éléments nutritifs des feuilles des espèces ligneuses notamment, est plus élevé que celui de la plupart des espèces herbacées ;
- le taux en éléments nutritifs reste généralement élevé sur une plus grande période (plus longue période active) ;
- pour les espèces animales telles que les chèvres et les dromadaires, la digestibilité présente moins de problèmes que pour les bovins et les moutons ;
- dans les régions du Sahel à concentration des écoulements et dans de grandes parties de la savane, la biomasse aérienne et souterraine des espèces ligneuses est (beaucoup) plus grande que celle des espèces herbacées, alors que ses variations d'une année sur l'autre sont beaucoup plus faibles.

Il y a donc des arguments ayant trait à la qualité nutritive et à la stabilité de l'écosystème, qui parlent en faveur d'une prise en compte des arbres et des arbustes.

Il n'est pas possible de considérer séparément la strate herbacée d'une part, et les arbres et arbustes d'autre part. Les espèces ligneuses et la strate herbacée se livrent une concurrence pour la survie et la production en vue de l'obtention des mêmes facteurs : lumière, eau et éléments nutritifs. Aussi, les questions qui se posent lors de l'évaluation des pâturages sont les suivantes :
- dans quelles circonstances la production de la strate herbacée peut-elle être déterminée séparément de la présence des espèces ligneuses ?
- de quelle manière, lors de l'estimation de la production de la strate herbacée, tenir compte de la présence des espèces ligneuses, lorsque les productions des deux strates s'influencent de manière significative ?

Une autre question se pose en matière de gestion : l'(éventuelle) influence négative qu'exerce la présence des espèces ligneuses sur la production de la strate herbacée, contrebalance-t-elle les avantages ; en d'autres termes, la coupe ou les nouvelles plantations sont-elles souhaitables ? Seule une connaissance quantitative des rapports de concurrence permet de donner un avis en la matière (Kessler & Breman,

1990).

La théorie de la concurrence

La concurrence entre la strate herbacée et les espèces ligneuses est complexe à cause des grandes différences qui existent entre les espèces respectives. Les conséquences principales en sont des cycles différents des éléments nutritifs et une certaine différenciation de niches écologiques qui en résulte.

Cette différenciation de niches écologiques est liée aux systèmes racinaires :
- en moyenne, la densité des racines des espèces ligneuses diminuera un peu moins vite au fur et à mesure de la profondeur, alors que la profondeur maximum de leurs racines sera souvent plus grande ;
- la durée de vie des racines des espèces ligneuses est plus longue.

En outre, les espèces ligneuses influencent davantage leur habitat. A cause de l'importance de la recirculation interne des éléments nutritifs (voir ci-après), elles sont capables dans certaines conditions de produire beaucoup plus de biomasse aérienne et souterraine que les espèces herbacées, et parallèlement de constituer une plus grande réserve de matière organique dans le sol. C'est par ce biais que l'infiltration de l'eau peut être favorisée par le « stem-flow » (l'eau de pluie captée par les couronnes, atteint partiellement le sol en coulant le long des troncs) et par un ruissellement moindre, permettant une humidification plus profonde du profil. On a déjà souligné que les pertes d'azote et autres éléments nutritifs sont supposés ne pas augmenter nécessairement, grâce au système racinaire permanent ; la contribution du taux de matière organique à la capacité d'échange de cations joue ici également un rôle (Budelman & Zander, 1990).

Les cycles des éléments nutritifs des espèces ligneuses diffèrent de ceux des espèces herbacées, en ce sens qu'une grande partie des éléments nutritifs nécessaires à la production annuelle de biomasse recircule de manière interne : la tombée des feuilles n'intervient qu'après le retrait d'une grande fraction d'azote et de phosphore (par exemple) dans les parties vivaces de la plante. Il manque des données concernant l'importance de cette redistribution pour les espèces sahéliennes. Mais pour le chêne, par exemple, il y a retrait de 40 % de l'azote sur un sol fertile ; dans des conditions de faible disponibilité en éléments nutritifs ce pourcentage s'élève à 60 %. Dans ce dernier cas, les pourcentages pour le phosphore peuvent même atteindre 75 à 80 % (Stachauki & Zimka, 1976). Chaque année, l'azote disponible pour la production représente le cumul de l'azote en provenance du sol et de l'azote mobilisé à partir de la réserve propre. La réserve interne en éléments nutritifs est sujette à beaucoup moins de pertes que la réserve externe. La production des espèces ligneuses peut donc être beaucoup plus élevée que celle des espèces herbacées et, par conséquent, la réserve de matière organique dans le sol est également plus importante. La minéralisation de cette matière organique fournit une fraction importante des éléments nutritifs absorbés à partir du sol. En outre, la fixation associative d'azote augmente vraisemblablement légèrement grâce à la disponibilité accrue d'exudat en tant que source énergétique ; cette disponibilité augmente parallèlement à la biomasse. Les espèces herbacées pérennes occupent une position intermédiaire entre les espèces ligneuses et les espèces annuelles. Leur durée de vie plus courte et leur capacité de stockage plus faible font qu'elles ne peuvent atteindre les dimensions et la production

de nombreuses espèces ligneuses, bien que la recirculation interne en tant que fraction de l'utilisation annuelle totale des éléments nutritifs, ne diffère pas beaucoup de celle des espèces ligneuses. Pour *Andropogon gayanus* par exemple, la valeur maximale observée était de 50 % pour la recirculation interne d'azote (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 291).

La différence entre les espèce ligneuses, les espèces herbacées pérennes et les espèces annuelles se manifeste davantage lorsque la translocation des éléments nutritifs avant la chute des feuilles est maximale, en d'autres termes, en l'absence de pâture pendant la croissance et avant le stade nécrotique. Dans le cas d'une exploitation totale de la production annuelle des espèces ligneuses et des espèces pérennes, il n'y a, selon toute vraisemblance, pas de différence de production avec les espèces annuelles, à condition que les espèces ligneuses et pérennes survivent à cette exploitation. Pour un même sol et un climat identique, la fraction exploitable de la production annuelle des trois groupes diffère peu en quantité absolue. On peut s'attendre à ce que les espèces ligneuses aient une légère plus-value par rapport aux espèces herbacées pérennes, ainsi que ces dernières par rapport aux espèces annuelles, dans le cas d'un régime d'exploitation bien conçu ; c'est-à-dire dans le cas d'une pâture d'intensité relativement faible intervenant assez tardivement dans la saison, de façon à assurer chaque année une recirculation interne suffisante. Ceci permet de conserver une biomasse souterraine plus importante que celle des espèces annuelles, avec une plus grande possibilité inhérente d'absorption d'éléments nutritifs peu mobiles tels le phosphore. Néanmoins, il ne faut pas que l'intensité de pâture soit si faible, ou ait lieu si tardivement dans la saison que la préférence se porte sur les espèces annuelles, compte tenu de leur qualité et de leur quantité. Il est peu probable que les espèces ligneuses prennent le pas sur les espèces pérennes ou même annuelles en tant que producteurs de fourrage, car une partie importante de leur production annuelle se situe dans le bois, non utilisable pour le bétail.

Sur un trajet nord-sud, la différenciation de niche écologique et la différence dans le cycle des éléments nutritifs ne détermineront pas partout de façon identique le rapport entre la strate herbacée et les espèces ligneuses (Kessler & Breman, 1990).

La biomasse pouvant être engendrée par les espèces ligneuses grâce à la circulation interne des éléments nutritifs, se différencie davantage de celle de la strate herbacée au fur et à mesure de l'accroissement de la disponibilité en éléments nutritifs. La disponibilité en azote notamment augmente, bien que légèrement, du nord vers le sud, plus ou moins proportionnellement à la pluviosité. Dans le cas hypothétique d'un recouvrement de 100 % par les espèces ligneuses dans le nord du Sahel, le N_b lié à cette disponibilité en azote ne sera supérieur que de quelques kilos par hectare à la situation avec la seule strate herbacée. Par contre, dans le sud de la savane, la différence peut atteindre des dizaines de kilos.

D'autre part, la différenciation de niche écologique sera la plus grande dans le nord, quand les espèces ligneuses ont la possibilité de s'installer là où elles pourront disposer pendant au moins une partie de l'année d'eau non accessible à la strate herbacée. A ces endroits, la disponibilité en éléments nutritifs sera également légèrement supérieure. A mesure que vers le sud, l'eau constitue de moins en moins le facteur limitatif, la strate herbacée et les espèces ligneuses se concurrenceront de plus en plus pour obtenir les mêmes éléments nutritifs, concentrés principalement dans la partie supérieure du profil du sol. La

différenciation de niche écologique et les différences de cycles d'éléments nutritifs vont ainsi dans le même sens : une concurrence croissante entre les espèces ligneuses et la strate herbacée du nord vers le sud. Si les espèces annuelles sont les plus fortes dans le nord à cause de leur stratégie de survie, cette place est occupée dans le sud par les espèces ligneuses (I.1.4).

La concurrence dans la pratique

Le rapport graphique entre la production de la strate herbacée et le recouvrement par les espèces ligneuses des pâturages du Sahel proprement dit, donne l'impression d'une corrélation légèrement positive. Il ne faut pas en conclure que l'influence des espèces ligneuses sur la strate herbacée y est exclusivement positive, car la combinaison d'une production relativement élevée de la strate herbacée avec une production relativement élevée des espèces ligneuses intervient là où la disponibilité relativement élevée en eau et en éléments nutritifs résulte de la concentration des écoulements.

Cette situation générale connaît une exception ; il s'agit des végétations sur des substrats à modèles d'infiltration fortement hétérogènes qui recèlent déjà un composant ligneux important compte tenu de la faible pluviosité du Sahel (I.2.3.2). La production de la strate herbacée y est plus faible que dans les autres végétations. Ailleurs, et malgré la différenciation de niche écologique, la concurrence pour les éléments nutritifs et l'eau n'est pas toujours absente, la preuve en est l'embroussaillement dans le cas de surpâturage ; ce phénomène se présente même (très localement) dans le Sahel. Plus au sud également, en présence d'espèces ligneuses, la différenciation de niche écologique n'entraîne pas un surplus d'éléments nutritifs tel qu'il en résulterait une augmentation conséquente de la production de l'ensemble de la strate herbacée - sous le couvert des espèces ligneuses et en plein champ -. D'après les mesures du phosphore dans la biomasse aérienne de la strate herbacée par exemple, mesures effectuées pendant 3 ans sur un trajet entre l'isohyète 200 et 1000 mm, il apparaît qu'il n'a pas été possible d'établir une corrélation avec le recouvrement ligneux très variable. D'éventuels petits surplus de phosphore disponibles disparaissent dans le bruit de fond occasionné par des différences plus importantes (1 à 2 kg/ha) de fertilité du sol. Aussi, l'éventuel surplus de phosphore pour la production primaire totale, résultant de la présence des espèces ligneuses, n'atteindra pas plus de 10 à 20 % maximum de ce bruit de fond : 0,15 à 0,30 kg/ha. Les estimations théoriques effectuées pour un substrat sablonneux dans le Ranch de Niono suggèrent des valeurs encore plus faibles ; ces estimations ont été basées sur la répartition des racines des espèces ligneuses et sur la disponibilité en phosphore dans le sol, par rapport à la durée et la profondeur de l'humidification du sol pendant la saison de croissance.

Bien que sur l'ensemble de la saison de croissance, les éléments nutritifs et l'eau soient plus limitatifs dans le Sahel et la savane que la lumière, la concurrence pour ce dernier facteur joue un rôle dans la répartition des deux premiers facteurs. Il en est ainsi parce que l'intensité de rayonnement en tant que telle est déjà insuffisante pour la croissance potentielle d'une végétation C_4 (sont nécessaires 840 à 910 J/m² par seconde ; de 9.00 à 15.00 h en moyenne 700 J/m² par seconde sont disponibles dans le nord du Sahel diminuant jusqu'à 560 dans le sud de la savane). L'interception de la lumière par les espèces ligneuses devrait dans le cas d'un recouvrement fermé, faire baisser l'intensité de rayonnement au-dessus de la strate herbacée jusqu'à 210 J/m² seconde dans le nord du Sahel et jusqu'à 14 J/m² par seconde dans

le sud de la savane ; cette interception de la lumière s'accentue du nord vers le sud, à cause de l'augmentation de la biomasse constituée de branches, de troncs et du nombre de couches de feuillage. Elle peut se présenter localement dans le nord ; vers le sud elle se généralise. La moyenne pondérée (ombragée ou non par les espèces ligneuses) avant la sécheresse, en l'absence d'une influence fortement anthropogène de la densité des espèces ligneuses, indiquait une intensité de rayonnement au dessus de la strate herbacée de 630 J/m² par seconde dans le nord du Sahel, de 490 dans le sud du Sahel, décroissant jusqu'à 70 dans la savane guinéenne du nord. Actuellement, dans l'hypothèse d'un recouvrement moindre par les espèces ligneuses, la valeur est de 490 J/m² par seconde pour le nord de la savane ; au sud du Sahel les conditions de luminosité ne sont donc déjà plus optimales pour la croissance d'une strate herbacée composée d'espèces C_3 (490 J/m² par seconde est le niveau de saturation pour la végétation C_3).

Conformément à l'observation selon laquelle une comparaison des situations existantes dans le Sahel proprement dit, ne permettait pas d'établir une relation significative entre la production de la strate herbacée et le taux de recouvrement par les espèces ligneuses, la conclusion qui s'impose est la suivante : en moyenne, les avantages de la différenciation de niches écologiques sont annulés par la concurrence accrue pour les éléments nutritifs et l'eau, concurrence régentée par l'interception de la lumière. Dans le Sahel, la disponibilité totale en éléments nutritifs est donc un peu plus élevée en présence d'espèces ligneuses qu'en leur absence. La quantité maximum liée dans le sud du Sahel à la moyenne du recouvrement ligneux et de la production, constitue si possible déjà une surestimation de ce surplus. En ce qui concerne l'azote, il s'agit d'environ 4 kg/ha sur la base d'un recouvrement par les espèces ligneuses de 15 % et de deux couches de feuillage.

La différenciation de niches écologiques diminue vers le sud, alors que l'interception de la lumière par les espèces ligneuses augmente rapidement. Parallèlement, la concurrence pour les éléments nutritifs augmente. La preuve en est l'accroissement de l'embroussaillement dès qu'il y a pâture intensive, et la production relativement élevée de strate herbacée là où les feux ont réduit les espèces ligneuses. Sur des sols alluviaux profonds, à l'isohyète 1100 mm, Sidibé (1976) a constaté une diminution de la production de la strate herbacée atteignant 5 t/ha pour un recouvrement par les espèces ligneuses de 10 %, et régressant jusqu'à 1 t/ha pour un recouvrement de 40 % !

Dans le sud du Sahel, les avantages de la présences d'espèces ligneuses dans les pâturages diminueront plus rapidement que les inconvénients (voir introduction). Les paramètres de l'équation permettant de calculer N_b (II.3.4) ayant été fixés sur le flanc sud du Sahel, en présence d'espèces ligneuses, il est suggéré de tenir compte de la concurrence entre la strate herbacée et les espèces ligneuses pour les situations où le recouvrement et/ou la production des espèces ligneuses dépasse la moyenne pour le sud du Sahel. En d'autres termes, il s'agit de situations où il est question d'un recouvrement de plus de 15 % et de deux couches de feuillage (voir ci-dessus), ou par exemple de plus de 7,5 % et de 4 couches de feuillage. La méthode pour estimer dans ce cas la valeur N_b et donc la production de la strate herbacée, est indiquée ci-dessous.

III.2.6.2. Strate ligneuse et production herbacée

Méthode

Il n'existe pas encore suffisamment de données quantitatives pour développer une méthode bien ancrée permettant l'estimation de la production de la strate herbacée dans le cas d'une concurrence significative avec les espèces ligneuses présentes. La méthode présentée ici est plus ou moins arbitraire, mais il s'agit d'une tentative de quantifier le mieux possible les considérations présentées dans III.2.6.1 . L'hypothèse de base est que la disponibilité moyenne annuelle d'azote pour la croissance aérienne de l'ensemble de la strate herbacée et des espèces ligneuses peut être calculée, de manière identique à celle utilisée pour la seule strate herbacée. En d'autres termes, on suppose que les paramètres de l'équation N_b (III.2.2.2) ne se modifient pas et qu'il est question d'une seule réserve de matière organique dans le sol, à partir de laquelle l'azote se libère par minéralisation en faveur des espèces ligneuses et de la strate herbacée.

La méthode suivante est proposée dans II.2.2.4 :
- Calculer la valeur totale de f pour les espèces ligneuses et la strate herbacée (f_{lh}). Voir figure II.4 pour la valeur f de la strate herbacée (f). La valeur f des espèces ligneuses (f_{li}) représente 40 % de celle de la strate herbacée (60 % de circulation interne d'azote) ; au minimum, elle est cependant de 0,20 (pertes par volatilisation). La valeur f_{lh} est une moyenne pondérée, le recouvrement par les espèces ligneuses valant comme facteur de poids pour f_{li} et (1 - recouvrement par les espèces ligneuses) pour f.
- Le N_b total peut être calculé à l'aide de l'équation N_b en remplaçant f par f_{lh}.
- Calculer la quantité maximum d'azote présente dans la production annuelle de feuilles et de fruits des espèces ligneuses, c'est-à-dire avant qu'il ne soit question du retrait de l'azote hors de la feuille. Comment calculer cette production est indiqué dans II.2.2.3 ; le tableau II.9 indique les taux d'azote des feuilles et des fruits. L'azote nécessaire à la croissance du bois et de l'écorce n'est pas pris en compte, car la base est constituée par la biomasse moyenne du bois et de l'écorce dans une situation d'équilibre.
- Prendre 0,4 de la quantité calculée d'azote dans les feuilles et les fruits, elle est prélevée dans le sol.
- Soustraire 4 kg/ha de cette quantité prélevée dans le sol, afin de tenir compte de la différenciation de niches écologiques.
- Soustraire la quantité d'azote restante du total N_b calculé. C'est ainsi que le N_b est obtenu, soit l'azote qui est disponible pour la croissance de la biomasse aérienne de la strate herbacée.
- Déterminer la biomasse de la strate herbacée comme indiqué dans II.2.2.4.

Illustrations

Pour donner une idée de l'utilité de la présente approche, les résultats de cette méthode seront présentés pour deux situations très divergentes. Dans le premier cas, la méthode est en outre suivie pas à pas.

Les dépressions argileuses au Ranch de Niono (II.4 ; unité F42) présentent un peuplement d'espèces

ligneuses avec un taux de recouvrement de 33 %, alors que le nombre de couches de feuillage est estimé à 4. La valeur f de la strate herbacée a été estimée à 0,35, f_{li} est alors à sa valeur minimale (0,20). La fraction d'azote qui se perd annuellement à partir de la biomasse aérienne de la strate herbacée et des espèces ligneuses (f_{lh}) est alors 0,33 × 0,20 + (1 - 0,33) × 0,35 = 0,30. Le total de *N* b combiné est alors de 0,0083 × 625/ (0,30 - 0,13) = 30,5 kg/ha (625 est la quantité d'eau infiltrée en mm pour l'unité, conformément au tableau II.13).

Un recouvrement de 33 % pour 4 couches de feuillage signifie une production de feuilles de 1584 kg/ ha par an. La production des fruits s'élèvera à 238 kg. La quantité d'azote que les arbres et les arbustes doivent mobiliser pour ce faire se monte à 1584 × 0,024 + 238 × 0,024 × 0,75 = 42,3 kg/ha (II.2.2.3). De ce chiffre 0,4 × 42,3 = 16,9 kg/ha proviennent du sol, mais seul 16,9 - 4,0 = 12,9 kg/ha est absorbé en concurrence avec la strate herbacée. Le N_b de la strate herbacée est donc 30,5 - 12,9 = 17,6 kg/ha. La valeur pouvant être déduite de mesures se référant à une année moyenne est de 15,5 kg/ha (tableau II.27).

La seconde situation a déjà été décrite. Il s'agit des résultats des recherches de Leloup et al. (1989), au plus profond de la savane soudanaise, présentés dans le tableau II.15. Dans ce cas également, pour une pluviosité deux fois plus importante (1050 mm), et un recouvrement moyen qui est presque une fois et demi plus élevé, cette méthode entraîne un Nb dans le bon ordre de grandeur : 6,3 kg/ha, alors que, sur la base des mesures pour une année moyenne, on obtient 9,7 kg/ha. La valeur mesurée est légèrement plus élevée, mais ceci est facilement explicable par le fait qu'il y a peu de temps encore, plusieurs unités étaient dominées par des graminées pérennes, disparues à présent. L'origine de « l'inconstance » des différences entre les valeurs théoriques des unités individuelles, et la valeur mesurée, n'est pas claire. Ceci peut être occasionné par des erreurs d'estimation des pertes par percolation sur les unités peu profondes et les erreurs qui en résultent dans l'estimation de la production des feuilles. Des erreurs de principe dans la méthode en tant que telle peuvent également être en cause. L'utilisateur est donc averti.

III.3. La production animale

III.3.1. Introduction

L'un des objectifs de ce manuel est d'évaluer quantitativement le niveau de la production animale à partir de données concernant la production végétale, et ce, plus particulièrement pour la production bovine de viande et de lait. Cet objectif requiert une approche progressive.

Le point de départ est constitué par la répertorisation des fourrages disponibles. Il s'agit là du matériel végétal produit par les végétations naturelles, mais également d'éventuels sous-produits agricoles et de produits agro-industriels de grande valeur tels que les farines basses et les graines de coton. Ensemble, ils forment le capital qui peut être converti en produit animal.

Parallèlement à l'évaluation quantitative des fourrages disponibles, il est indispensable d'indiquer pour

chacun la qualité en termes de valeur nutritive pour l'animal, et dans le cas présent du bovin. En effet, chaque kilo de matière végétale ne représente pas la même valeur nutritive. Cette dernière est déterminée par :
- la quantité maximum qu'un animal peut consommer par jour d'un type de fourrage donné ;
- le taux d'éléments nutritifs, notamment le taux de matière digestible (énergie digestible), le taux d'azote, de minéraux et de vitamines.

Un bon fourrage est un fourrage dont l'animal consomme de grandes quantités, qui contient par ailleurs un taux élevé d'éléments nutritifs et qui est d'une manière générale bien digestible. L'inverse est vrai pour un mauvais fourrage. L'approche qui est présentée ici, se limite à des considérations sur la digestibilité, le taux d'azote et l'ingestion, en tant que principaux facteurs déterminants pour la productivité des bovins. L'ensemble de ces trois paramètres donne la limite supérieure de la production escomptée sur la base d'une ration ou régime d'affouragement déterminés. Dans la pratique, il peut s'avérer que le taux de certains minéraux (par exemple P) ou de vitamines soit encore plus limitatif pour la production.

Parmi les trois paramètres indiqués : digestibilité, taux d'azote et ingestion, seul le taux d'azote constitue un paramètre physiologique végétal ; II.2.2.4 et II.3.6.6 traitent en détail de la manière d'évaluer ce paramètre pour un matériel végétal d'origine donnée. Qu'il soit estimé ou mesuré directement, le taux d'azote sera fréquemment le seul paramètre disponible, qui permettra de déduire la valeur nutritive. Cependant, la relation entre la digestibilité et l'ingestion de nourriture d'une part et le taux d'azote d'autre part, exige de plus amples explications. Pour les cas où les mesures de la digestibilité font défaut, la relation entre la digestibilité et le taux d'azote ainsi que l'utilisation qu'on peut en faire sont illustrés dans III.3.2 par des données relatives à la matière végétale de la région.

L'étape suivante concerne une estimation de la quantité maximum de matière sèche consommée journellement par un bovin, pour un fourrage dont le taux d'azote et la digestibilité sont connus. La quantité d'énergie (matière sèche digestible) dont l'animal dispose pour son maintien et sa production, se trouvent ainsi automatiquement déterminés. La manière de procéder pour en déduire l'ingestion de nourriture des bovins dans les pays sahéliens, est traitée dans III.3.3.
III.3.4 traite de la manière dont l'ingestion d'énergie résulte en gain ou perte de poids ; la production de lait est traitée dans III.3.5.

Démonstration est faite dans III.3.6 de l'importance de régimes alimentaires donnés sur la fécondité, à savoir, âge du premier vêlage et intervalles de vêlage.

Les paramètres les plus importants pour la productivité des bovins sont ainsi (à l'exception des risques de mortalité), liés aux fourrages disponibles. A l'aide de ces informations, il est possible de calculer la productivité d'un troupeau de bovins en fonction du niveau d'alimentation. Pour ce faire, un simple modèle démographique suffit. L'utilisation d'un tel modèle est expliqué dans III.3.7. A l'inverse, il est également possible de déterminer les exigences auxquelles doit répondre l'alimentation, en d'autres termes, les fourrages qui entrent en considération pour atteindre un certain niveau de production. Il s'agit

là d'une donnée importante pour estimer la capacité de charge (III.4).

III.3.2. Taux d'azote et digestibilité des fourrages grossiers

Dans le cadre du projet PPS (Penning de Vries & Djitèye, 1982), la digestibilité in vitro de près de 300 échantillons en provenance du Mali a été déterminée aux Pays-Bas. Pour ce faire, des échantillons standard de fourrages grossiers hollandais dont la digestibilité in vivo était connue, ont été utilisés pour procéder à la correction des valeurs in vitro. Des échantillons standard de plantes en provenance des pâturages des pays sahéliens n'étaient pas disponibles. Les imprécisions qui ont pu résulter de cette absence, concerneront notamment les échantillons de faible digestibilité (< 45 %), puisqu'il a fallu recourir pour ceux-ci à l'extrapolation. Les données classées par espèce, sont reprises dans la partie IV.

Les données disponibles ont été subdivisées en 6 groupes : données concernant les graminées annuelles, les légumineuses annuelles, autres herbes annuelles, graminées pérennes, espèces ligneuses et échantillons composés d'un certain nombre de types de végétation herbacées. La relation entre le taux d'azote et la digestibilité est indiquée dans les figures III.20a-f . La digestibilité qui y est représentée concerne la digestibilité in vivo de la matière organique pour des moutons, telle qu'elle a été évaluée sur la base de la détermination in vitro.

Figures III.20a-f
Rapport entre la digestibilité in vitro de la matière organique et le taux d'azote de la matière sèche des plantes en provenance des pâturages naturels non fertilisés de pays sahéliens.
——— rapport pour les graminées annuelles ; a : graminées annuelles (.), avec [rond blanc] : *Echinochloa colona* ; b légumineuses (.) ; c dicotylédones annuelles (.) et *Cyperaceae*(+) ; d : graminées pérennes (.), avec + : *Vetiveria nigritana* et [rond noir] *Echinochloa pyramidalis* & *stagnina* ; e : végétations herbacées dominées par : [carrée blanc] *Vetiveria nigritana*, [rond blanc] *Echinochloa stagnina*, [triangle blanc] *Panicum laetum*, + *Schoenefeldia gracilis* , × *Chloris* & *Dactyloctenium* , [losange] *Sporobolus helvolus* ; [carrée noir] *Ipomaea verticillata*, [rond noir] Oryza longistamata et [triangle inverse] menu journalier quelconque ; f : espèces ligneuses avec ×, ----- appétées, et +, - - - non appétées.

Les données concernant les graminées annuelles ont été choisies pour déterminer un rapport moyen. Celui-ci est représenté sur les figures par la ligne ininterrompue. Cette ligne permet de juger la représentativité du rapport moyen pour d'autres groupes d'échantillons.

Le groupe de graminées annuelles présente un rapport clairement positif entre le taux d'azote et la digestibilité de la matière organique (figure III.20a), bien que l'écart par rapport à la moyenne soit importante. Les échantillons avec un taux d'azote de plus de 23 g/kg présentent une digestibilité élevée uniforme d'environ 73 %. Ce sont des graminées jeunes et végétatives, dans certains cas même de plantules. La digestibilité en est plus faible que celle des graminées de régions tempérées : dans ces régions, les graminées de pâturages présentent à l'état jeune une digestibilité de la matière organique d'environ 80 %. La différence est entièrement imputable au fait que les graminées annuelles des pays sahéliens appartiennent en majorité aux plantes C_4, alors que les graminées des régions tempérées

appartiennent aux C_3. C'est ainsi que, dans des conditions contrôlées, Wilson et al. (1983) ont trouvé à l'intérieur du genre Panicum une différence moyenne de 7 unités entre les représentants de la catégorie C_4 et C_3. Les causes en sont les différences dans l'anatomie des feuilles et des tiges.

En-dessous d'un taux d'azote de 23 g/kg, la diminution de la digestibilité et du taux d'azote semblent aller de pair. Cette relation est bien connue pour la matière végétale ayant grandi dans des conditions comparables du point de vue du climat et de la fertilité du sol : au fur et à mesure du vieillissement de la végétation, le taux d'azote diminue par suite de la dilution de l'azote absorbé. Simultanément, la digestibilité diminue par suite de l'augmentation de la contribution de la tige et de la lignification accrue de la feuille et de la tige. Cette relation n'est donc pas causale.

Il faut par conséquent s'attendre à des divergences importantes par rapport à la moyenne, lorsque par suite de fertilisation, la dilution de l'azote est pour ainsi dire dissociée du vieillissement de la végétation ; dans ce cas un taux d'azote relativement élevé peut aller de pair avec un coefficient de digestibilité faible.

C'est ce qui se passe avec évidence dans le groupe des légumineuses. N'étant pas dépendantes de l'apport d'azote à partir du sol, leur niveau d'azote baisse moins au fur et à mesure de leur vieillissement.

Dans les groupes des autres herbes annuelles, les écarts par rapport à la moyenne sont moins extrêmes (figure III.20). Ceci contrairement au groupe de graminées pérennes pour lesquelles à première vue il ne semble pas exister de relation. Sur les figures, une inspection plus poussée de la nuée de petits points fait néanmoins apparaître que les différences liées aux espèces, éventuellement entremêlées partiellement avec les facteurs d'emplacement tels que fertilité du sol, sont une source importante de variations. On constate d'une part le matériel d'Echinochloa spp. avec une digestibilité relativement élevée (taux élevé d'hydrates de carbone de réserve dans la tige) pour de faibles taux d'azote, et d'autre part *Vetiveria nigritana* avec, sur pratiquement tout le cheminement des taux d'azote, une digestibilité moyenne faible. Si les deux espèces sont isolées, le rapport déterminé plus haut suit grosso-modo la nuée de points restants. Par rapport aux légumineuses, les échantillons (de feuilles) des espèces ligneuses s'écartent encore davantage de la relation trouvée pour les graminées annuelles. Pour les espèces ligneuses, le taux d'azote n'est pas le reflet direct de la disponibilité en azote dans le sol ; par la redistribution de l'azote avant la chute des feuilles, la réserve d'azote propre est importante.

Puisque les légumineuses ne représentent en moyenne que 5 % de la biomasse et que les graminées pérennes sont rares, la relation moyenne des graminées annuelles entre le taux d'azote et la digestibilité sera souvent utile pour permettre l'estimation de la digestibilité d'une végétation à taux d'azote connu, surtout pour les bovins. L'illustration en est faite par le groupe d'échantillons mixtes provenant de différentes végétations herbacées. Les résultats dans la figure III.20e sont positifs : la plupart des échantillons mixtes a une relation entre le taux d'azote et la digestibilité se situant à proximité du rapport moyen, à l'exception de cette relation de l'échantillon de la végétation dominée par Echinochloa stagnina.

Le degré d'utilité du rapport moyen entre le taux d'azote et la digestibilité, ainsi que les erreurs qui peuvent intervenir par suite de divergences, sont également illustrés par l'exemple suivant. Les données utilisées sont celles de Diallo (1978) qui a déterminé la composition du menu des zébus qui transhument chaque année entre le delta du Niger au Mali et le Sahel mauritanien. A certaines époques de l'année, des échantillons du menu journalier ont été prélevés, dont le taux d'azote et la digestibilité de la matière organique ont été déterminés in vitro. Ces échantillons n'ont pas été pris en compte pour les figures III.20a-f et pour la détermination du rapport moyen. Il s'agit donc d'échantillons indépendants, mais originaires de la même région ; de plus, ils ont été analysés de la même manière que les autres échantillons. Le tableau III.13 représente par les chiffres des deux premières colonnes, la relation graphique de la figure III.20a. Les deux colonnes suivantes montrent comment la digestibilité de la matière sèche pour les bovins a été estimée en deux étapes, à partir des mesures in vitro de la digestibilité de la matière organique pour les moutons.

Tableau III.13
Rapport moyen entre la digestibilité et le taux d'azote des fourrages grossiers des pays sahéliens.

taux d'azote (g/kg)	digestibilité (%)		
	matière organique	matière sèche	
	1)	2)	3)
3	29	27,5	32
4	33	31,5	36
5	37	35,5	39
6	40	38,5	42
7	44	42,5	45
8	47	45,5	48
9	51	49,5	52
10	54	52,5	54
11	56	54,5	56
12	59	57,5	59
13	61	59,5	60
14	63	61,5	62
15	65	63,5	64
16	66	64,5	65
17	68	66,5	67
18	69	67,5	67

19	70	68,5	68
20	71	69,5	69
21	72	70,5	70
22	72	70,5	70
23	73	71,5	71
|			
40	73	71,5	71

1) estimation de la digestibilité *in vivo* de la matière organique pour des moutons, sur base de mesures *in vitro* ;
2) digestibilité de la matière sèche pour des moutons, calculée sur la base de données de Troelsen & Campbell (1969) en soustrayant 1,5 unité de la digestibilité de la matière organique ;
3) digestibilité de la matière sèche pour des bovins, estimée sur la base d'une équation de régression de van Soest (1982) : Y = 8,02 + 0,881 X, X étant la digestibilité de la matière sèche pour les moutons et Y la digestibilité de la matière sèche pour les bovins.

Grâce aux taux d'azote mesurés dans les échantillons du fourrage de Diallo (1978), il a été possible d'estimer la digestibilité de la matière organique à l'aide des deux premières colonnes du tableau III.13. Le tableau III.14 compare cette estimation avec les valeurs mesurées. Ensuite, sur la base de la dernière colonne et à l'aide des informations de III.3.3 , on a estimé l'ingestion et, par conséquent, la modification de poids d'animaux de 150 kg. Cette estimation a également été faite à l'aide de la digestibilité estimée et de la digestibilité mesurée. Ceci débouche à nouveau sur deux comparaisons. Les résultats figurent dans le tableau III.14.

Tableau III.14
Comparaison entre la digestibilité estimée et mesurée du menu et les estimations d'ingestion journalière de nourriture et de gain de poids des zébus peul durant leur transhumance annuelle entre le delta du Niger et le Sahel mauritanien.

mois	taux de N du fourrage (g/kg)	digestibilité[1] du fourrage (%)		ingestion de mat. sèche digestible ($g/kg^{0,75}$)		modification du poids pour un animal de 150 kg (kg/mois)	
		mesurée	estimée[2]	1[3]	2[4]	1[3]	2[4]
j	10	49	54	39	43	2	4
f	9	51	51	40	40	2	2
m	13	49	61	42	53	4	10
a	12	58	59	49	50	8	8

m	9	57	51	41	40	3	2
j	14	65	63	59	56	14	12
j	22	60	72	65	81	17	23
a	20	70	71	75	77	17	18
	14	62	63	55	56		
s	22	64	72	69	81	20	23
	22	63	72	68	81		
o	9	48	51	37	40	1	2
n	11	52	56	42	46	4	6
moyenne annuelle :		56	60	50	54	8,4	10,0

---

[1] concerne la digestibilité in vitro de la matière organique pour des moutons ;
[2] dérivée du taux d'azote du fourrage ;
[3] estimée sur la base de la digestibilité mesurée du fourrage ;
[4] estimée sur la base de la digestibilité dérivée du taux d'azote du fourrage ; Diallo, 1978.

En comparaison avec la valeur mesurée, la digestibilité moyenne annuelle est surestimée de 4 unités (60 contre 56 %), soit 7 % de la valeur mesurée. Ceci entraîne une surestimation de l'ingestion de matière sèche digestible de 8 % ; par contre, sur la base de la digestibilité estimée, le gain de poids serait surestimée de 19 %. Dans I.3.6 il a déjà été souligné que pour un bas niveau de production, des faibles différences pour l'ingestion d'énergie entraînent des différences relativement importantes dans la production. Voici ce qui explique peut-être que Diallo, sur la base de mesures du périmètre thoracique, estime le gain de poids à un niveau inférieur à celui chiffré ici : pendant la saison des pluies, les jeunes génisses auraient grossi de 51 kg, alors qu'en dehors de cette saison des pluies, les mesures de Diallo ne supposent pas de modification de poids. Les calculs qui ont été faits concluent à une croissance de 68 kg pour la saison des pluies et de 24 kg pour les mois restants. Il se peut que ces différences s'expliquent également par des manques absolus en fourrage au cours du séjour dans le delta.

Pour en revenir au contenu de la figure III.20 et du tableau III.13, les conclusions suivantes s'imposent :
- pour un taux d'azote connu, une digestibilité moyenne peut être prise en considération (cf. au tableau III.13), lorsqu'il s'agit d'échantillons mixtes constitués de végétations non fertilisées dominées par des graminées annuelles ;
- pour une contribution importante de légumineuses et pour une dominance d'espèces pluriannuelles spécifiques comprenant au moins Echinochloa spp. et Vetiveria nigritana, ce rapport moyen ne peut être appliqué ;
- le rapport moyen ne s'applique pas non plus aux fourrages d'arbres et arbustes.

Dans les cas d'exception mentionnés ci-dessus, il est recommandé d'utiliser pour une fraction du menu les sous-figures correspondantes de la figure III.20a-f, et de se référer à la partie IV pour les espèces spécifiques.

Dans ce cas, il est possible d'utiliser les équations établies par van der Meer & Breman (1991). En plus du taux d'azote, ils ont utilisé le taux de cellulose brute, ce qui permet d'obtenir une meilleure prévision de la digestibilité de la matière organique. Huit équations de régression ont été testées du point de vue de leur valeur utilitaire, au moyen de la méthode de Montgomery & Peck (1982). Ce test a été effectué pour les espèces individuelles, ainsi que pour les groupes d'espèces des figures III.20a-d . Dans la majorité des cas, les meilleures prévisions ont été obtenues avec les équations de type $CD_{mo} = a + b [CB] + c [N]$, dans laquelle :

CD_{mo} = coefficient de digestibilité de la matière organique (%) ;

[*CB*] = taux de cellulose brute (g/kg) et
[*N*] = taux d'azote (g/kg), le deux de la matière sèche ;
a, b et c = coefficients de régression.

Pour certaines (groupes) d'espèces les équations de type
$CD_{mo} = a + b [CB] + c [N] + d [CB]^2 + e [N]^2$ satisfaient mieux (d et e = coefficients de régression). Le premier type est utilisé dans le présent cas pour trois groupes d'espèces, le deuxième seulement pour les légumineuses :

- graminées annuelles
$CD_{mo} = 76 - 0,09 [CB] + 0,7 [N]$ (équation III.9)

- graminées pérennes
$CD_{mo} = 79 - 0,11 [CB] + 0,6 [N]$ (équation III.10)

- légumineuses annuelles
$CD_{mo} = 96 - 3,4 [CB] + 5,4 [N] + 0,03 [CB]^2 - 0,2 [N]^2$ (équation III.11)

- autres dicotylédones annuelles
$CD_{mo} = 65 - 0,07 [CB] + 0,6 [N]$ (équation III.12)

Pour les espèces individuelles (IV.2.3) les équations du type III.10 sont utilisées plus fréquemment.

Notamment dans le cas des graminées pérennes, les prévisions s'améliorent fortement pour les espèces individuelles. Le fait de se limiter à un seul stade de développement permet d'obtenir une plus grande précision lors de cette détermination indirecte de la digestibilité. Pour quelques espèces très courantes, la partie IV.2.3 fournit des équations pour la période de formation des graines. Dans cette optique, 75 échantillons supplémentaires ont été analysés, échantillons utilisés aussi dans les équations ci-dessus mais non dans la figure III.20.

III.3.3. Ingestion de fourrage par les bovins

L'estimation de la quantité de fourrage ingéré constitue une étape décisive pour le calcul de la production animale : il ressortait déjà de III.3.2 que la vitesse de croissance d'un bovin est fortement dépendante des quantités d'énergie ingérées journellement. C'est pourquoi on a tenté d'établir, dans la mesure du possible, un rapport entre la description disponible des fourrages grossiers des pays sahéliens, les caractéristiques des races bovines et l'ingestion de nourriture.

La connaissance des fourrages grossiers locaux concerne principalement le taux d'azote, puis la digestibilité. L'ingestion de fourrage est positivement corrélée à ces deux caractéristiques. Le choix de ces deux paramètres pour constituer un modèle d'ingestion de fourrage s'inscrit donc dans la logique des choses.

La prise en compte des différences d'ingestion de nourriture en fonction des races est beaucoup moins nette. Ceci découle de l'absence de modèles explicatifs permettant la déduction de l'ingestion de fourrages en fonction des caractéristiques du fourrage et des races. L'idée répandue concernant la régulation de l'ingestion de nourriture, souligne l'importance des limites physiques face à l'ingestion de fourrages grossiers : dans cette optique, la panse des ruminants est trop petite pour leur permettre de manger de grandes quantités d'un fourrage qui n'est que lentement et partiellement digestible. Sur la base de cette hypothèse, la conception d'un modèle d'ingestion est impossible ; les informations nécessaires sont insuffisantes ou trop sommaires, par exemple en ce qui concerne la connaissance des variations du volume de la panse d'une race à l'autre et entre les différents stades physiologiques d'une même race. C'est pourquoi les estimations ci-dessous reposent sur une autre approche : d'une part, elles sont basées sur la connaissance des besoins des bovins en protéines et en énergie, d'autre part elles reposent sur l'interprétation d'essais alimentaires avec des bovins et des moutons, en provenance des ouvrages spécialisés.

Le mashona a été choisi comme modèle pour le bovin d'Afrique, car il s'agit là de la seule race pour laquelle les informations essentielles sont disponibles. Par ailleurs, sa taille est comparable à la race bovine moyenne de l'Afrique de l'Ouest. L'origine de la race des mashonas se situe en Afrique du Sud (Zimbabwe) ; elle possède du sang du Bos indicus ainsi que du Bos taurus. Les poids des animaux adultes mâles et femelles atteignent en moyenne respectivement 400 et 300 kg.

La méthode de travail et les hypothèses qui ont permis les estimations de l'ingestion de fourrage sont explicitées ci-dessous. La première étape concerne la différenciation entre les fourrages permettant à l'animal d'atteindre le niveau de maintien, et les fourrages qui présentent des insuffisances à cet égard. En effet, la croissance des ruminants dans des circonstances extensives, est d'une manière générale la résultante d'une alternance de périodes de gain de poids et de périodes de pertes de poids. Les fluctuations saisonnières de la qualité des fourrages jouent un rôle important dans cette alternance.

Le niveau de maintien est défini comme étant un état de l'animal où les quantités de ses lipides et de ses protéines corporels ne subissent pas de modifications. Pour maintenir cet état, l'animal doit consommer

journellement une certaine quantité de protéines et d'énergie. L'énergie est considérée ici comme synonyme de matière sèche digestible (MD), protéines de quantité d'azote ingérée multipliée par 6,25.

Pour les bovins, les besoins pour le maintien sont estimés par jour à 36 g de matière sèche digestible par kg de poids métabolique (36 g/kg^{0,75} par jour) et à 0,5 g d'azote par kg de poids métabolique (0,5 g/kg^{0,75} par jour). Ces chiffres sont basés sur la synthèse de l'ARC (1980) et correspondent en grande partie aux expériences d'Elliott & Topps (1963a et b) effectuées sur les bovins mashona. Une ration susceptible de couvrir le maintien, devra contenir les deux composants dans leur juste proportion : par g d'azote 72 g MD, ou 0,014 g d'azote par g MD. Les rations qui contiennent moins d'azote ne répondent pas aux normes de maintien, leur consommation sera également inférieure au niveau nécessaire pour le maintien.

Une autre exigence est posée à la composition de la ration de maintien : le taux d'azote doit de toute façon être suffisant pour compenser les pertes en azote par les excréments. Le taux d'azote digestible est proportionnel au taux d'azote. Le taux d'azote pour lequel le taux d'azote digestible est égal à zéro se situe en moyenne à 5,5 g/kg. Il s'agit là de la moyenne résultant de 28 équations de régression citées par Minson (1982) dans son précis. Cette moyenne correspond aux résultats d'analyse de Elliott & Fokkema (1960) sur les fourrages africains et les races bovines et ovines d'Afrique.

Pour un taux d'azote de 5,5 g/kg, la quantité d'azote ingérée par kg de fourrage est égale à celle éliminée par les excréments. Le taux minimum d'azote nécessaire à l'entretien doit cependant être plus élevé, et ce, suffisamment pour compenser également les pertes endogènes par l'urine. Il ressort des expériences (Elliott & Topps, 1963a et b, Elliott et al., 1964) qu'un taux de protéines de 40 g/kg (taux d'azote 6,4 g/kg) ne permet pas de bilan positif d'azote. Ce bilan positif est par contre possible avec 50 g/kg (taux d'azote 8,0 g/kg), aussi le choix a porté sur le taux minimum d'azote nécessaire pour le maintien soit 7 g/kg. Autre exigence, il faut que la digestibilité d'une ration avec un taux d'azote de 7 g/kg comporte environ 50 % de matière sèche. En-dessous de cette valeur, ce qui est généralement le cas pour les graminées de la région (voir tableau III.13), la valeur limite du taux d'azote se déplace également : d'une manière générale un bilan positif d'azote ne sera possible que pour un taux d'azote de $\geq$8 g/kg. Les explications seront fournies ultérieurement.

Jusqu'à présent, deux exigences ont été formulées pour la composition du fourrage de maintien : un taux minimum en protéines allant de pair avec un taux d'azote de 7 g/kg ainsi qu'un rapport minimum protéine-énergie correspondant à un taux d'azote de 14 g/kg MD. Les fourrages comportant relativement plus de protéines permettent à l'animal de croître, c'est-à-dire d'augmenter ses protéines et ses lipides corporels. Ceci découle des données utilisées dans cet ouvrage pour la constitution du gain de poids. Les données utilisées sont celles de Chigaru & Holness (1983) pour les génisses mashona ayant un poids entre 120 et 300 kg, ce qui correspond dans le cas présent à la croissance post-pubertaire (figure III.27). Dans cette plage de poids, chaque prise de kg apparaît constituée chimiquement de 170 g de protéines et de 360 g de lipides ; le reste est constitué pour la majeure partie d'eau et pour une petite partie de minéraux. Sur la base de la valeur énergétique des protéines animales et des lipides de respectivement 23,6 et 39,3 MJ/kg, ceci signifie 18,1 MJ/kg de poids. En d'autres termes, cela implique une fixation de

9,4 g de protéines par MJ d'énergie. Ce chiffre est important car il permet de calculer comment se dessinera au-delà du niveau de maintien, l'ingestion d'énergie par rapport à celle des protéines, ou comment l'ingestion de matière sèche digestible peut croître de façon maximale en tant que fonction de l'ingestion d'azote. Les facteurs de conversion utilisés sont les suivants :
- la valeur énergétique de 1 kg MD est fixée à 17,6 MJ ;
- l'efficacité avec laquelle l'énergie digestible est convertie en énergie corporelle est fixée à 0,5 ; cette valeur est basée sur un facteur 0,8 pour la conversion de l'énergie digestible en énergie métabolisable et sur un facteur de 0,6 pour la conversion de cette dernière en énergie nette (0,6 est l'efficacité globale, mesurée chez les animaux alimentés ad libitum) ;
- l'efficacité maximum permettant de convertir le surplus d'azote en protéines est fixé à 0,54, conformément aux résultats des expériences de Storm et al. (1983), sur la base des protéines microbiennes.

Ceci implique qu'au-delà du niveau de maintien, l'ingestion d'énergie par g N peut augmenter au maximum de 41 g MD. Cette proportion est inférieure à celle calculée pour l'entretien (72 g MD par g d'azote) ; en d'autres termes : pour les bovins mashona, la croissance exige relativement plus de protéines que le maintien. Il faut souligner que cela ne s'applique pas à toutes les races de bovins. Sur la base de l'exemple des boeufs « Shorthorn » de la figure III.26, un calcul analogue permet de déterminer que l'ingestion sera au maximum de 76 g MD par g d'azote pour la croissance. Il s'agit là de valeurs légèrement supérieures à celles exigées pour le maintien.

La figure III.21 représente graphiquement le modèle utilisé pour les besoins et les ingestions possibles des bovins mashona. Suivant le rapport protéines et énergie (azote et digestibilité) du fourrage offert, l'ingestion de matière sèche digestible peut être inférieure, égale ou supérieure au niveau de maintien.

Figure III.21

Représentation graphique pour les génisses mashona :
- des besoins en énergie (ici ingestion de matière sèche digestible) et en protéines (ici ingestion d'azote) et
- de l'ingestion journalière de matière sèche digestible à partir de fourrages avec des rapports différents de digestibilité et de taux d'azote et une synthèse microbienne efficace des protéines (fourrages du groupe $PRO_{dé}$, voir texte).

La droite A1-A2-A3 indique le besoin en énergie par rapport au besoin en protéines. A2 correspond au niveau d'entretien pour lequel l'ingestion de matière sèche digestible est de MD_{ing} = 36 g/kg^{0,75} par jour et l'ingestion d'azote de N_{ing} = 0,5 g/kg^{0,75} par jour. L'inclinaison de la droite est égale à 41 g de matière sèche par g d'azote et est obtenue par déduction à partir de la composition du gain de poids de génisses mashona. Il est supposé qu'au-delà et en-dessous du niveau d'entretien, les besoins en énergie et en protéines se comportent de manière analogue.
A1 et A3 représentent les ingestions de matière sèche digestible de fourrages ayant respectivement un rapport faible et élevé de protéines/énergie, ce qui ressort d'ailleurs de l'inclinaison des droites en pointillés. Les croix concernent les résultats d'essais alimentaires avec des génisses mashona (Elliott, 1967). Les fourrages étaient des mélanges de *Chloris gayana* et de fourrages concentrés. Seule l'ingestion maximale de matière sèche digestible pour une ingestion d'azote donnée est représentée.

Une concrétisation plus poussée de ce modèle entraîne un certain nombre de complications. La première découle des caractéristiques typiques de la physiologie des ruminants : la nourriture ingérée passe par l'oesophage pour atteindre les premiers compartiments de l'estomac où les fermentations microbiennes la transforme en d'autres produits qui constituent la véritable nourriture du ruminant. Il s'agit de cellules microbiennes, constituées principalement de protéines, et d'acides gras volatils, produit résiduel de la dégradation anaérobie. Dans ce contexte, le sort des protéines du fourrage est important. Seules les protéines qui passent des premiers compartiments de l'estomac à l'intestin grêle sont disponibles pour le ruminant. Selon le type de fourrage, le résultat de la fermentation microbienne dans les premiers compartiments de l'estomac est tel, que la quantité de protéines arrivant à l'intestin grêle peut être égale (ou même légèrement supérieure) à celle du fourrage ingéré, ou encore qu'une partie plus ou moins grande des protéines ingérées est perdue. Ces deux catégories de fourrages seront désignées respectivement par groupe $PRO_{dé}$ et groupe PRO_{su} ; dans le premier groupe, il est question d'un *dé*ficit relatif en *PRO*téines, dans le second d'un *su*rplus. L'inverse est valable pour l'énergie. Pour le modèle d'ingestion représenté dans la figure III.21, ceci signifie que seuls les fourrages du groupe $PRO_{dé}$ permettent directement le calcul de l'ingestion de protéines à partir du rapport digestibilité/taux d'azote. Pour les fourrages du groupe PRO_{su}, la quantité d'azote ingérée est une surestimation de la quantité de protéines disponibles pour le ruminant. Passons à présent à la classification des fourrages en groupe $PRO_{dé}$ et PRO_{su}.

Les pertes nettes en protéines dans les premiers compartiments de l'estomac dépendent de la disponibilité relative d'azote par rapport à l'énergie. Lorsque les micro-organismes dans la panse disposent d'une quantité relativement élevée d'azote, ils utiliseront les protéines des fourrages comme source d'énergie. Ce phénomène va de pair avec la formation d'ammoniaque. La concentration d'ammoniaque dans les premiers compartiments de l'estomac constitue donc une mesure pour apprécier les modifications des disponibilités de protéine entre la bouche de l'animal et l'intestin grêle où se produit une résorption d'acides aminés. Il est d'usage de considérer que la valeur critique pour laquelle il ne se produit pas encore de pertes en protéines est une concentration NH_3-N de 50 mg/l. Satter et Roffler (1981) affirment que pour des concentrations NH_3-N se situant entre 20 et 50 mg/l, l'efficacité de l'utilisation d'azote pour la synthèse microbienne des protéines diminue fortement. Pour le modèle utilisé dans le cas présent, la valeur minimum a été choisie afin de différencier les fourrages du groupe $PRO_{dé}$ et ceux du groupe PRO_{su}.

La figure III.22 établit la relation entre cette différenciation et les différences de taux d'azote et de digestibilité de la matière sèche du fourrage. Cette figure montre la concentration d'ammoniaque en fonction des deux paramètres. Comme on peut s'y attendre, une augmentation de la digestibilité entraîne une plus grande efficacité d'utilisation de l'azote pour la synthèse microbienne des protéines. Les fourrages qui répondent au critère selon lequel tout l'azote ingéré est disponible sous forme de protéines dans l'intestin grêle, appartenant ici au groupe $PRO_{dé}$, sont des fourrages avec une combinaison de taux d'azote et de digestibilité de la matière sèche située à gauche de la ligne droite. Une comparaison avec la

figure III.20a-f montre que dans la pratique, pour la plupart des fourrages, la concentration NH_3-N dans la panse sera supérieure à 20 mg/l. La plupart des fourrages grossiers présentent donc un surplus d'azote par rapport à l'énergie pour la fermentation microbienne, et appartiennent ainsi au groupe PRO_{su}. Ceci malgré le fait que la production des fourrages est souvent limitée par l'azote (III.2.2.2).

Figure III.22

Rapport entre la concentration d'ammoniaque mesurée dans la panse (mg NH_3-N par litre), le taux d'azote et la digestibilité de la matière sèche du fourrage.

Les courbes proviennent de Satter & Roffler (1981), d'observations individuelles d'Elliott & Topps (1964) : à gauche de la droite se situent les fourrages appartenant au groupe $PRO_{dé,}$ à droite les fourrages du groupe PRO_{su} (voir texte).

La ligne droite de la figure III.22, qui sépare les groupes $PRO_{dé}$ et PRO_{su}, est représentée par l'équation suivante :

$$CD_{ms} = ([N]_{cd} + 8,4)/0,307$$

dans laquelle
CD_{ms} = coefficient de digestibilité de la matière sèche en % ;
$[N]_{cd}$ = taux d'azote correspondant, à la limite entre les fourrages des groupes $PRO_{dé}$ et PRO_{su}, en g/kg.

C'est l'inverse de cette équation qui sera utilisé ci-dessous, pour calculer la valeur de $[N]_{cd}$ pour un coefficient de digestibilité donné, la lecture de la figure créant trop d'imprécision.

$$[N]_{cd} = 0,307\ CD_{ms} - 8,4 \qquad \text{(équation III.13)}$$

Il est ensuite possible de calculer l'ingestion pour les fourrages appartenant au groupe $PRO_{dé}$. En effet dans ce groupe, pour une ingestion d'azote de 0,5 g/kg^{0,75} par jour, l'ingestion de matière sèche digestible est de 36 g/kg^{0,75} par jour et au-delà de ce niveau de maintien, l'ingestion de matière sèche digestible augmente de 41,6 g par g d'azote ingéré en plus. Mathématiquement le rapport obtenu entre l'ingestion de matière sèche digestible (MD_{ing}, g/kg^{0,75} par jour) et l'ingestion d'azote (N_{ing}, g/kg^{0,75} par jour) est le suivant :

$$MD_{ing} = 15,2 + 41,6\ N_{ing} \qquad \text{(équation III.14)}$$

La conversion en un rapport entre ingestion de matière sèche (MS_{ing}, g/kg^{0,75} par jour), digestibilité de la matière sèche (CD_{ms}, %) et taux d'azote ([N], g/kg) donne :

$$MS_{ing} = 1520 / (CD_{ms} - 4{,}16\ [N\ ]) \qquad \text{(équation III.15)}$$

(voir le tableau III.13 pour le rapport entre le coefficient de digestibilité de la matière sèche, CD_{ms}, et celui de la matière organique, CD_{mo}).

Enfin, on a supposé que ce rapport s'applique également en-dessous du niveau de maintien.

Pour les fourrages du groupe PRO_{su}, la déduction de l'ingestion est moins aisée. Pour les fourrages du groupe $PRO_{dé}$, le rapport protéines/énergie (dans le cas présent le rapport azote/digestibilité) est apparu lié positivement à l'ingestion. Pour les fourrages du groupe PRO_{su}, il serait dans l'ordre des choses qu'une augmentation de ce rapport ait également un effet positif, mais dans une moindre mesure compte tenu de la différence entre la quantité de protéines ingérées et la disponibilité réelle des protéines.

Des essais alimentaires sur des moutons (entre autres données de Demarquilly & Weiss, 1970 et de l'INRA, 1978) ont fait apparaître que dans le cas de subdivision du groupe PRO_{su} en fourrages de même digestibilité, l'ingestion s'avère en effet plus élevée à mesure que le taux d'azote augmente. A l'intérieur de chaque catégorie de digestibilité, il existe un rapport linéaire entre l'ingestion de matière sèche digestible et l'ingestion d'azote, tel qu'il a été déduit ci-dessus pour les fourrages du groupe $PRO_{dé}$. Une différence importante concerne le coefficient de régression : en moyenne celui-ci s'élève à un quart seulement de celui calculé pour le groupe $PRO_{dé}$. Dans le cas présent, ce facteur est également appliqué pour le modèle d'ingestion des bovins ; toutefois, il faut souligner que l'obtention de ce facteur n'est pas clairement définie.

C'est à l'aide de ce raisonnement qu'est déduite la relation entre l'ingestion et la digestibilité de la matière sèche pour les fourrages du groupe PRO_{su}, l'exemple choisi étant un fourrage d'une digestibilité de 60 % (matière sèche ; digestibilité de la matière organique CD_{mo} = 61 %, suivant tableau III.14). Il ressort des figures III.20a-e, que le taux d'azote de cette digestibilité peut varier d'à peu près 5 à 25 g/kg (la figure III.20f n'est pas prise en compte ici, à cause des problèmes éprouvés entre autres par les bovins lors de la digestion des fourrages ligneux). La figure III.22 et l'équation correspondante (équation III.13) démontrent que les fourrages ayant une digestibilité de la matière sèche de 60 %, et dont le taux d'azote est inférieur ou égal à 10 g/kg, appartiennent au groupe $PRO_{dé}$ (avec une transformation efficace des protéines dans la panse), et que ceux avec un taux d'azote supérieur à 10 g/kg, appartiennent au groupe PRO_{su} (avec une transformation inefficace des protéines dans la panse). Ce taux d'azote à la limite entre les fourrages des groupes $PRO_{dé}$ et PRO_{su} à une digestibilité donnée de la matière sèche a été appelé ci-dessus $[N\ ]_{cd}$. Dans ce cas, il s'agit donc de $[N]_{60}$, un taux d'azote de 10 g/kg. Les équations ci-dessus

sont valables pour un taux d'azote inférieur ou égal à 10 g/kg (équations III.13 et III.14). Pour un taux d'azote de 10 g/kg l'ingestion de matière sèche MS_{ing} est donc 1520/(60 - 4,16 × 10) = 82,6 g/kg^{0,75} par jour. L'ingestion de matière sèche digestible MD_{ing} est alors de 60/100 × 82,6 = 49,6 g/kg^{0,75} par jour.

Lorsque le taux d'azote est supérieur à 10 g/kg, l'intersection x de l'équation : $MD_{ing} = x + 10 \times N_{ing}$, peut être calculée, l'équation représentant le rapport entre l'ingestion de matière sèche digestible et l'ingestion d'azote. Car MD_{ing} et N_{ing} sont maintenant connus : $MD_{ing} = 49,6$ et $Ning = [N]_{cd}/1000 \times 82,6 = 10/1000 \times 82,6 = 0,83$. Donc $49,6 = x + 10 \times 0,83$ et $x = 41,3$, ou

$$MD_{ing} = 41,3 + 10 \times N_{ing}$$

Dans ce cas l'ingestion de matière sèche est de

$$MS_{ing} = 4130 / (CD_{ms} - 10 \times [N]/10), \text{ ou}$$

$$MS_{ing} = 4130 / (60-[N]) \quad \text{(à condition que } [N] > [N]_{cd} \text{ ; équation III.16)}$$

Tout comme dans les équations III.13 et III.14, MD_{ing} et MS_{ing} sont exprimés en g/kg^{0,75} par jour, la digestibilité de la matière sèche CD_{ms} en pourcentage et le taux d'azote $[N]$ en g/kg.

L'équation pour MD_{ing}, relative aux fourrages avec un taux d'azote supérieur à 10 g/kg découle de l'hypothèse selon laquelle au delà d'un taux d'azote de 10 g/kg, une nouvelle élévation du taux d'azote entraîne une augmentation de MD_{ing} d'environ 10 g par kg d'azote ingéré en plus ; le coefficient de régression ne correspond pas à 41,6 comme pour les fourrages du groupe $PRO_{dé}$, mais au quart, comme décrit plus haut, donc à 0,25 × 41,6 ~ 10. Il faut noter que les valeurs de 41,3 et 4130 des deux dernières équations ne sont valables que pour CD_{ms} = 60 %, la digestibilité de la matière sèche choisie comme exemple.

Quelques observations s'imposent :
- Le modèle implique que l'ingestion du fourrage grossier est soumis systématiquement à la disponibilité en protéines. Il semble alors évident que des suppléments de protéines permettent d'augmenter l'ingestion de la plupart des fourrages grossiers. Dans la pratique, ceci ne s'avère pas toujours exact. Les effets positifs de surplus de protéines ou d'urée se manifestent la plupart du temps pour les fourrages appartenant au groupe $PRO_{dé}$. Pour les fourrages du groupe PRO_{su}, les résultats sont très divergents. La raison en est incertaine :
- L'importance de la constitution de l'augmentation en poids sur les estimations de l'ingestion de

fourrages a déjà été soulignée ; il en va de même pour les taux d'azote qui permettent d'affecter les fourrages dans les groupes $PRO_{dé}$ et PRO_{su}.

Malgré ces incertitudes, les estimations semblent suffisamment réalistes pour être utilisées dans de premières estimations de la production animale. Les éléments suivants sont de toute façon peu sujets aux incertitudes :
- la différenciation sur la base du taux d'azote entre, d'une part, les fourrages qui ne permettent pas de croissance et dont la consommation entraîne une perte de poids, et, d'autre part, les fourrages qui entraînent l'effet inverse ;
- l'effet positif qu'exerce sur l'ingestion une meilleure digestibilité et un taux d'azote plus élevé.

L'incertitude concerne notamment l'importance exacte des effets cités et leurs causes.

A l'appui de l'argumentation ci-dessus, les résultats de la méthode de travail, pour le pâturage naturel moyen de la région (tableau III.13), ont été comparés avec les résultats des recherches en Australie (Hendricksen et al., 1982, figures III.23 et figure III.24). Ces recherches concernent l'ingestion de fourrages et, anticipant sur III.3.4 , la croissance des bovins sur des pâturages naturels sans apports d'engrais dans le sud-est du Queensland. Les graminées dominantes y sont Heteropogon contortus, Botriochloa bladhii et Dichantium sericeum. Les correspondances entre les deux groupes de données sont étonnantes compte tenu des méthodes différentes utilisées. Pour un même taux d'azote, les estimations de la vitesse de croissance des bovins dans les pays sahéliens sont légèrement moins élevées, mais sur toute une année ceci est compensé en partie car les estimations de pertes de poids sont également plus faibles.

Figure III.23

Rapport mesuré (——) entre l'ingestion journalière de matière sèche digestible (MD_{ing}) et le taux d'azote du fourrage [N] pour des bovins sur des pâturages naturels en Australie, comparé au rapport obtenu par déduction (-----) pour les bovins sur le pâturage naturel moyen (tableau III.13) dans les pays sahéliens.

Rapport mesuré suivant Hendricksen *et al.* , 1982 ; rapport déduit : $MD_{ing} = 3{,}33\ [N] + 9{,}4$.

Les flèches indiquent le niveau de maintien.

Figure III.24

Rapport mesuré (——) entre les modifications journalières de poids ([Delta]PV) et le taux d'azote du fourrage [N] pour des bovins sur des pâturages naturels en Australie, comparé au rapport obtenu par déduction (-----) pour des bovins sur le pâturage naturel moyen (tableau III.13) dans les pays sahéliens.

Rapport mesuré suivant Hendricksen *et al.* , 1982 ; rapport déduit :[Delta]PV = 1,63 [*N*] - 12,6 pour [*N*] $\geq$ 8 et [Delta] PV = 1,89 [*N*] - 14,6 pour [*N*] $\leq$8.

L'ingestion de la matière sèche (MD_{ing} ; $g/kg^{0,75}$ par jour), par les bovins puissant sur le pâturage naturel

moyen de la région (tableau III.13), comme présentée par la figure III.23, est décrite par l'équation suivante :

$$MD_{ing} = 3{,}33\ [N] + 9{,}4 \qquad \text{(équation III.17)}$$

dans laquelle
[*N*] = taux d'azote du fourrage en g/kg.

L'ingestion de matière sèche (MS_{ing} ; g/kg^{0,75} par jour) est décrite dans ce cas par l'équation :

$$MS_{ing} = (333\ [N\ ] + 940)/CD_{ms} \qquad \text{(équation III.18)}$$

dans laquelle
CD_{ms} = coefficient de digestibilité de la matière sèche en %.

Pour la commodité de l'utilisateur de ce manuel, les estimations arrondies d'ingestion pour toute la gamme des pâturages de la région ont été présentées sous la forme de deux tableaux III.15 et tableau III.16. Le tableau III.15 indique l'ingestion de matière sèche en tant que fonction de son taux d'azote et de sa digestibilité ; le tableau III.16 indique l'ingestion de matière sèche digestible. Les données imprimées en italique concernent les fourrages du groupe $PRO_{dé}$. Elles ont été calculées à l'aide de l'équation III.14. Les autres données concernent les fourrages du groupe PRO_{su}. L'ingestion de matière sèche et l'ingestion de matière sèche digestible sont calculées à l'aide de l'équation III.16, pour autant que cela concerne des fourrages avec une digestibilité de matière sèche de 60 %. Parallèlement à l'équation III.16, d'autres équations ont été établies, par catégorie de digestibilité. Ces équations ont été utilisées pour procéder aux autres estimations d'ingestion. De la même manière, il serait en principe possible de compléter les tableaux III.15 et III.16 (combinaisons improbables de digestibilité de matière sèche et de taux d'azote pour les herbes et les graminées). Dans les situations où seul le fourrage des espèces ligneuses est disponible, cela peut s'avérer nécessaire, mais les expériences avec le fourrage ligneux sont trop rares pour étayer une telle extrapolation.

Tableau III.15

Estimation de l'ingestion journalière de la matière sèche par des génisses (g/kg^{0,75}) en tant que fonction du taux d'azote et de la digestibilité des fourrages.

digestibilité de la matière sèche (%)	taux d' azote (g/kg)															
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	36

36	64	68	73	78	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	64	68	72	78	83	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	***65***	68	72	77	83	89	96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	***60***	68	72	77	82	88	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	***56***	68	72	76	81	87	93	100	-	-	-	-	-	-	-	-
46	***52***	69	72	76	81	86	92	98	-	-	-	-	-	-	-	-
48	***48***	***66***	***73***	77	81	86	91	97	104	-	-	-	-	-	-	-
50	***46***	***61***	***75***	78	82	87	92	98	104	-	-	-	-	-	-	-
52	***43***	***56***	***75***	79	83	87	92	97	103	110	-	-	-	-	-	-
54	***41***	***52***	***73***	80	83	88	92	97	103	109	-	-	-	-	-	-
56	***39***	***49***	***67***	80	84	88	93	97	103	109	116	-	-	-	-	-
58	***37***	***46***	***62***	81	85	89	93	98	103	109	115	-	-	-	-	-
60	***35***	***43***	***57***	***83***	86	90	94	98	103	109	115	121	-	-	-	-
62	***34***	***41***	***53***	***75***	87	91	95	99	104	109	115	121	-	-	-	-
64	***32***	***39***	***50***	***68***	89	92	96	100	105	110	115	121	128	-	-	-
66	***31***	***37***	***46***	***62***	92	96	100	104	108	113	119	125	(131)	-	-	-
68	***30***	***35***	***44***	***58***	***84***	98	101	105	110	115	120	125	(132)	(139)	(146)	(165)
70	***28***	***34***	***41***	***54***	***76***	100	103	107	112	116	121	(127)	(133)	(140)	(147)	(164)
72	***27***	***32***	***39***	***50***	***69***	102	105	109	113	118	(123)	(128)	(134)	(140)	(148)	(164)

Les données entre parenthèses concernent les fourrages dont l'estimation d'ingestion journalière de matière sèche digestible dépasse 85 g/kg^{0,75}, dans le cas présent plus que nécessaire pour la croissance maximale supposée ; les données ***en italique*** concernent les fourrages dont la combinaison de taux d'azote et de digestibilité est telle que l'adjonction d'urée à la ration exerce un effet positif sur l'ingestion. Il s'agit de fourrages du groupe $PRO_{dé}$. Les autres données concernent des fourrages du groupe PRO_{su}.

Tableau III.16

Estimation de l'ingestion journalière de la matière sèche digestible par des génisses (g/kg^{0,75}) en tant que fonction du taux d'azote et de la digestibilité des fourrages.

digestibilité de la matière sèche (%)	taux d' azote (g/kg)															
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	36
36	23	24	26	28	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	24	26	27	29	32	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

40	***26***	27	29	31	33	36	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	***25***	29	30	32	34	37	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	***24***	30	32	34	36	38	41	44	-	-	-	-	-	-	-	-
46	***24***	32	33	35	37	40	42	45	-	-	-	-	-	-	-	-
48	***23***	***32***	35	37	39	41	44	47	50	-	-	-	-	-	-	-
50	***23***	***30***	37	39	41	43	46	49	52	-	-	-	-	-	-	-
52	***22***	***29***	39	41	43	45	48	51	54	57	-	-	-	-	-	-
54	***22***	***28***	***40***	43	45	47	50	53	56	59	-	-	-	-	-	-
56	***22***	***27***	***37***	45	47	49	52	55	58	61	65	-	-	-	-	-
58	***21***	***27***	***36***	47	49	52	54	57	60	63	67	-	-	-	-	-
60	***21***	***26***	***34***	***50***	52	54	56	59	62	65	69	73	-	-	-	-
62	***21***	***25***	***33***	***46***	54	56	59	61	64	68	71	75	-	-	-	-
64	***21***	***25***	***32***	***43***	57	59	61	64	67	70	74	78	82	-	-	-
66	***20***	***24***	***31***	***41***	61	63	66	68	71	75	78	82	(86)	-	-	-
68	***20***	***24***	***30***	***39***	***57***	66	69	72	75	78	81	85	(90)	(94)	(99)	(112)
70	***20***	***24***	***29***	***37***	***53***	70	72	75	78	81	85	(89)	(93)	(98)	(103)	(115)
72	***20***	***23***	***28***	***36***	***50***	73	76	79	82	85	(89)	(92)	(97)	(101)	(106)	(118)

Voir remarques du tableau III.15.

Les données fournies dans les deux tableaux sont en principe applicables aux génisses, mais peuvent également être utilisées pour les animaux mâles ; les différences entre les deux catégories sont relativement faibles pour ce qui est de l'ingestion et de la croissance (voir III.3.4).

Il n'en va pas de même pour la catégorie des animaux laitiers. Les animaux produisant du lait ingèrent en général une plus grande quantité du même fourrage que leurs congénères du même âge ne fournissant pas de lait. L'importance de la différence est illustrée par les données d'Elliott & Fokkema (1961) et Elliott et al. (1961). Il s'agit d'ingestions de fourrage sur une période de deux ans mesurées sur des animaux en pâture. Il ressort de la figure III.25 que l'ingestion de fourrage par des animaux produisant du lait est de 10 à 40 % supérieure à celle des autres animaux en croissance. Cette différence semble s'accentuer au fur et à mesure de l'amélioration de la qualité du fourrage. Pour le calcul de la production laitière et de la productivité du troupeau, on a supposé dans le cas présent, que l'ingestion des animaux produisant du lait est en moyenne supérieure de 20 % aux indications du tableau III.15.

Figure III.25

Relation entre l'ingestion de fourrages de vaches produisant du lait et de vaches n'en produisant pas (r) en rapport avec la digestibilité de la matière organique du fourrage.

Elliott & Fokkema, 1961 ; Elliott *et al.* , 1961.

Pour finir, reste à savoir quel est le rapport entre les estimations d'ingestion de nourriture et les hypothèses usuelles pour un animal standard (UBT). Il est d'usage de prendre 2,5 % du poids ; ceci correspond à 6,25 kg de matière sèche par jour. En supposant pour un boeuf des pays sahéliens une qualité moyenne du menu avec un taux d'azote de 10 g/kg et une digestibilité de la matière sèche de 54 %, l'ingestion journalière selon le tableau III.15 sera de 80 g/kg^{0,75} par jour soit 5,0 kg, donc de loin inférieur. En réalité, cette différence sera plus atténuée, car il faut tenir compte du fait qu'une population de bovins se compose de différentes catégories d'animaux dont des jeunes et des animaux produisant du lait, pour lesquels l'ingestion est relativement plus élevée. Les calculs de la productivité du troupeau (tableau I.24) indiquent qu'un animal moyen de la population pèse 175 kg et ingère une quantité de matière sèche de 2,2-2,3 % de son propre poids. Dans des conditions d'alimentation défavorables, le poids moyen se rapproche même des 150 kg. La différence est ainsi ramenée à un peu plus de 10 % (6,25 kg au lieu de 5,5 par jour). Pour la conversion du nombre total des bovins d'une population en unités standard de 250 kg, le facteur de 0,7 peut être utilisé. Une UBT présente alors une ingestion correspondant à 5,5 kg de matière sèche par jour.

III.3.4. Croissance et perte de poids en fonction de l'alimentation

Dans des conditions d'alimentation optimales, la croissance est un processus continu. A partir de la naissance, la vitesse de croissance augmente jusqu'à atteindre un maximum à la puberté, elle diminue ensuite et tombe à zéro lorsque le poids adulte est atteint. Le résultat se concrétise souvent par une courbe de croissance de forme sigmoïde.

Dans des conditions d'alimentation sub-optimales, caractéristiques pour l'élevage extensif, la croissance est discontinue : les périodes de gain de poids alternent avec des périodes d'arrêt de croissance ou de perte de poids. Bien évidemment, la courbe de croissance s'écarte alors fortement de la forme sigmoïde et présente au contraire des dents de scie caractéristiques.

Par contre le développement de l'animal reste continu : depuis le jeune veau nourri par sa mère jusqu'à l'adulte reproducteur. Cette évolution n'entraîne pas seulement des modifications d'aspect extérieur mais également des conséquences pour la composition chimique du corps. Ceci est important pour deux raisons :
- la composition chimique du corps permet de déduire les besoins de l'animal en protéines et en énergie pour la croissance ;
- inversement, ces informations peuvent être utilisées pour calculer la vitesse de croissance pour une disponibilité donnée d'éléments nutritifs, c'est-à-dire une ingestion donnée de protéines et d'énergie.

L'évolution de l'animal se fait de manière générale en deux phases distinctes : une phase juvénile depuis la naissance jusqu'à la puberté, et une phase post-pubertaire. La figure III.26 illustre clairement cette différence chez les boeufs « Shorthorn » (Haecker, 1920). La figure indique l'accroissement de la quantité de protéines et de lipides en tant que fonction du poids. L'inclinaison des segments de la droite indique la part que prennent les différents composants dans le gain de poids pour une évolution donnée. La part de chaque composant est donc constante et caractéristique pour l'évolution du poids en question.

Figure III.26

Comparaison entre la quantité de protéines et de lipides corporels chez les boeufs « Shorthorn » en rapport avec leur poids vif.

[rond noir] protéines, × lipides ; Haecker, 1920.

Pour la plage de 100-300 kg, il apparaît qu'un gain de poids de 1 kg va de pair avec un accroissement de 0,20 kg de protéines et de 0,18 kg de lipides. Au-delà d'un poids de 300 kg environ, chaque kg de poids supplémentaire entraîne un accroissement de 0,13 kg de protéines et de 0,55 kg de lipides.

Jusqu'à un poids de 300 kg environ, la fixation des protéines dans les muscles et les organes est donc relativement élevée, par rapport à la fixation des lipides. Il en découle que le besoin en protéines des jeunes animaux est grand et que la nature y pourvoit par le lait maternel.

Le poids pour lequel intervient le passage de la phase juvénile à la phase post-pubertaire est une des caractéristiques par excellence de la race. Pour les races de grande taille, ce passage se situe à un poids plus élevé que pour les races de petite taille. En gros, ce passage s'effectue lors de l'atteinte d'un tiers du poids adulte. Pour les bovins des pays sahéliens, cela correspond à un poids de 100 kg environ. Ceci correspond aux données de Chigaru & Holness (1983) pour les vaches mashona, représentées dans la figure III.27. Bien que les mesures de la composition du corps ne concernent que la phase post-pubertaire, il est clair que l'importance relative du lipide se modifie après atteinte d'un poids vif d'approximativement 100 kg.

Figure III.27

Comparaison entre la quantité de protéines, de lipides et de minéraux corporels pour les génisses mashona en rapport avec leur poids vif.

[rond noir] protéines, [rond blanc] minéraux et × lipides ; Chigaru & Holness, 1983 ; lignes pointillées représentent des estimations.

Comme on l'a déjà mentionné dans III.3.3, chaque kg de gain de poids dans la phase post-pubertaire comporte 0,17 kg de protéines et 0,36 kg de lipides. Il s'agit là des données qui ont été utilisées pour le modèle d'ingestion de fourrage. Les estimations d'ingestion se réfèrent par conséquent à la phase post-pubertaire. Pour la phase juvénile (jusqu'à 100 kg), on suppose que le lait maternel représente l'élément principal de l'alimentation. La vitesse de croissance durant cette période est en tout cas fortement tributaire de la quantité disponible de lait et donc de manière générale, de la quantité utilisée pour la consommation humaine.

Les paramètres suivants sont nécessaires pour calculer le gain de poids en tant que fonction de l'ingestion de nourriture :

- ingestion de matière sèche digestible MD_{ing} en g/kg^{0,75} par jour ;
- besoins d'entretien en matière sèche digestible, soit 36 g/kg^{0,75} par jour ;

- poids métabolique $PV^{0,75}$ en $kg^{0,75}$;
- contenu énergétique de la matière sèche digestible, soit 17,6 MJ/kg ;
- utilisation de l'énergie digestible pour conversion en énergie corporelle, soit 0,5 ;
- contenu énergétique de 1 kg de poids, soit 18,1 MJ.

Gain de poids par jour en kg par tête lorsque $MD_{ing} > 36$:

$$GP = ((MD_{ing} - 36) \times PV^{0,75} \times 17,6 \times 0,5)/(18,1 \times 1000),$$

donc

$$GP = 49 \times 10^{-5} (MD_{ing} - 36) \times PV^{0,75} \qquad \text{(pour } MD_{ing} > 36 \text{ ; équation III.19)}$$

dans laquelle :
GP = gain de poids (kg/jour) pour les bovins des pays sahéliens.

La vitesse de croissance maximum déterminée génétiquement est évaluée ici à 0,75 kg/jour pour les bovins en question. Pour un animal de 100 kg, ceci exige une ingestion d'énergie égale à 2,4 fois le besoin du maintien. Un plus grand gain de poids sera dans la pratique souvent le résultat de modifications simultanées dans le remplissage de l'estomac-intestin. En moyenne, ce remplissage est constant sur une année et c'est la raison pour laquelle il n'a pas été pris en ligne de compte.

Les calculs de pertes de poids pour $MD_{ing} < 36$ nécessite une estimation pour l'utilisation de l'énergie corporelle destinée au maintien ; le facteur retenu est de 0,84 conformément aux données de ARC (1980).

Perte de poids par jour en kg par tête lorsque $MD_{ing} < 36$:

$$PP = ((36 - MD_{ing}) \times PV^{0,75} \times 17,6 \times 0,5) / (0,84 \times 18,1 \times 1000),$$

donc

$$PP = 58 \times 10^{-5} (36 - MD_{ing}) \times PV^{0,75} \qquad \text{(pour } MD_{ing} < 36 \text{ ; équation III.20)}$$

dans laquelle :
PP = perte de poids (kg/jour) pour les bovins des pays sahéliens.

La figure III.28 facilite l'utilisation des deux équations, elle permet de trouver le poids métabolique en

fonction du poids. La figure III.24 (ligne pointillée) présente un cas particulier : les résultats de l'utilisation de ces équations pour le pâturages naturel moyen de la région suivant le tableau III.13. Pour ce cas particulier, le gain et la perte de poids par animal peuvent être décrits par des équations simples :

$$GP = (1{,}63\,[N] - 12{,}6) \times 10\text{-}3\ PV^{0,75} \qquad ([N] \geq 8\ g/kg\ ;\ \text{équation III.21})$$

et

$$PP = (1{,}89\,[N] - 14{,}6) \times 10^{-3}\ PV^{0,75} \qquad ([N] < 8\ g/kg\ ;\ \text{équation III.22})$$

dans laquelle :
[*N*] =taux d'azote du fourrage ingéré en g/kg ;
GP et *PP* en kg/jour

Figure III.28
Rapport entre le poids métabolique des bovins et le poids vif.

Les vitesses de croissance des animaux mâles et femelles dans des conditions analogues ne diffèrent pas beaucoup tant que les animaux femelles ne participent pas encore à la reproduction. A partir du moment où les animaux femelles sont gravides, l'énergie en provenance de la nourriture est répartie sur diverses fonctions : maintien et croissance du corps, croissance du foetus, et par la suite, production de lait.

Ces concordances et différences dans la vitesse de croissance sont représentées dans la figure III.29 . Cette figure compare le poids des animaux mâles et femelles de même âge dans des conditions analogues. Ces données concernent les boeufs n'dama de différentes régions de l'Afrique de l'Ouest (ILCA, 1979), les zébu peul du delta du Niger au Mali (Wagenaar et al., 1986) et les boeufs baoulé de la Côte d'Ivoire (ILCA, 1979).

Figure III.29
Rapport entre les poids des mâles et femelles n'dama (a), zébu-peul (b) et baoulé (c) à un âge identique et dans des conditions analogues d'alimentation (——), comparé à la situation théorique sans différences de poids entre les sexes (-----).
a : jusqu'à un poids de la femelle de 170 kg : PV [mâle]= 1,07 PV [femelle] (ILCA, 1979)
b : jusqu'à un poids de 185 kg de l'animal femelle : PV [mâle] = 1,08 PV [femelle] (Wagenaar *et al.*, 1986)
c : jusqu'à un poids de 140 kg de l'animal femelle il n'y a pas de nette différence de poids entre les animaux mâles et femelles (ILCA, 1979).
La flèche indique le poids moyen du début de la première gestation des génisses zébu-peul. Pour le zébu peul, le poids moyen des génisses atteignant la gravidité est de 187 kg. Jusqu'à ce poids, les animaux mâles grandissent en moyenne 8 % plus vite, par la suite la différence est plus importante. Pour le bétail n'dama il en va pratiquement de même : le poids permettant la première conception n'est apparemment pas très différent. Cette différence existe cependant lors d'une comparaison avec une race de taille vraiment plus petite, le boeuf baoulé. A partir d'un poids de 140 kg des différences évidentes

apparaissent dans les poids des animaux mâles et femelles de cette race.

Un dernier aspect de la courbe de croissance concerne le poids adulte. Il s'agit là en premier lieu d'une caractéristique de la race, mais le poids dépend également des conditions alimentaires.

Pour les animaux mâles, il n'a pas été possible de concrétiser l'incidence de l'alimentation sur le poids adulte. On a donc supposé que cette catégorie atteint un poids de 400 kg, bien que la vitesse de croissance et donc l'âge auquel ce poids sera atteint, dépendent de l'alimentation.

Pour les animaux femelles, la situation est résolument différente. Ces animaux peuvent être fécondés pour la première fois dès qu'ils atteignent un poids situé entre 150 et 220 kg. Si à ce moment les conditions d'alimentation sont très mauvaises, la mère doit faire appel à ses propres réserves pour produire son veau : son poids diminuera en-dessous du seuil critique permettant une nouvelle gravidité. Dans un tel cas, la vache a besoin de temps après la première lactation pour retrouver son poids et sa condition ; ensuite le cycle pourra se renouveler. On suppose que, dans une telle situation, le poids adulte moyen s'élève à 200 kg. Dans le cas extrême inverse, lorsque l'alimentation est bonne pendant une grande partie de l'année, la production d'un veau grève relativement peu les propres réserves de la vache ; le poids moyen adulte peut alors être supposé aux environs de 300 kg.

Ce rapport entre le poids adulte des vaches et les conditions moyennes d'alimentation est étayé par les données en provenance de la pratique. Ces données sont à la base de la construction de la figure III.30. D'une manière générale, la qualité de l'alimentation ne peut être déduite des rapports sur la production animale de la région. On a cherché par conséquent une dérivée qui permet d'exprimer les différences des conditions d'alimentation. Le choix lui, a porté sur le gain de poids des animaux au cours de leur deuxième année. A cet âge, ils sont généralement sevrés, et se nourrissent donc exclusivement de fourrages grossiers. Un autre argument pour justifier ce choix, est le fait que dans l'élevage extensif, les génisses sont rarement gravides avant leur troisième année. Les gains de poids des animaux dans divers lieux géographiques peuvent ainsi être comparés aisément. Cette approche suppose bien entendu que toutes les catégories d'animaux du troupeau soient soumises aux mêmes conditions d'alimentation. Ce n'est qu'alors que les différentes catégories réagiront de façon analogue : lorsque les animaux âgés de deux ans grandissent lentement, les poids adultes et la fécondité seront également décevants, et inversement. Le graphique représenté dans la figure III.30 a été choisi en corrélation avec la figure III.33.

Figure III.30

Rapport entre le poids adulte des bovins femelles et l'accroissement du poids des génisses de la même population pendant la seconde année de vie.

> Données relatives aux races n'dama, zébu-peul, zébu-azawak, « Shorthorn » de l'Afrique de l'Ouest × azawak × n'dama, et bunaji ; Bartha, 1971 ; CIPEA, 1978 ; Fall *et al.*, 1982 ; ILCA, 1979 ; Wagenaar *et al.*, 1986 ; Wheat *et al.*, 1972 ; Wheat & Broadhurst, 1968 et Wilson, 1983 ; vaches adultes de 3 ans [rond blanc], de ≥ 4 [rond noir].

III.3.5. Production laitière

Il est encore plus difficile de faire une estimation fiable de la production de lait par période de lactation, sur la base de la disponibilité des fourrages (du point de vue quantitatif et qualitatif) que d'estimer la vitesse de croissance d'animaux non producteurs de lait. L'accroissement de l'ingestion de nourriture sous l'influence de la lactation, la durée de la période de cet accroissement et la mesure dans laquelle l'animal utilise l'énergie ingérée pour sa propre croissance ou bien mobilise des réserves pour la production de lait, sont autant de facteurs qui interviennent. Les estimations grossières qui sont faites dans le cadre de ce manuel ne peuvent tenir compte de la plupart de ces facteurs. Les hypothèses ont été les suivantes :
- pendant la période de lactation, l'ingestion de nourriture par les vaches laitières est en moyenne supérieure de 20 % aux estimations pour les animaux en phase de croissance indiquées dans le tableau III.15 ;
- la période de lactation dure un an ;
- toute l'énergie provenant du fourrage dépassant le niveau maintien est utilisé pour la production de lait ;
- l'utilisation d'énergie digestible pour la production de lait est de 0,5 ;
- le contenu énergétique d'un kg de lait est de 3,5 MJ.

La figure III.31 illustre les résultats des estimations faites sur ces hypothèses, la variable indépendante étant le gain de poids des animaux pendant leur seconde année, lequel constitue donc la mesure de la qualité de l'offre en fourrages. La production de lait est également indiquée dans les cas où l'accroissement de l'ingestion est supposé de 25 % au lieu de 20 %. En outre, deux données expérimentales ont été intégrées : l'une concerne la production de lait des vaches zébu de la Station du Sahel à Niono au Mali ; l'autre concerne la production de lait de vaches du Diafarabé dans le delta du Niger au Mali (CIPEA, 1978 ; Wagenaar et al., 1986).

Les deux mesures correspondant davantage avec l'hypothèse d'une ingestion de fourrage supérieure de 20 %, c'est cette donnée qui est proposée dans III.3.3 et utilisée dans I.3.6.

Figure III.31
Rapport entre la production laitière de vaches et le gain de poids de génisses, de la même population, pendant leur seconde année (comme mesure de la qualité des fourrages).
Rapport pour une ingestion de fourrage de 20 % supérieure pendant la période de lactation, avec deux valeurs mesurées au Mali (——) ; rapport dans l'hypothèse où l'ingestion serait plus élevée de 25 % (-----).

III.3.6. Reproduction

Le processus de reproduction peut être décrit à l'aide de trois paramètres : l'âge du premier vêlage, l'intervalle des vêlages et la durée de vie moyenne des vaches.

Pour les deux premiers paramètres, la relation avec l'alimentation peut être clairement démontrée ; par contre les variations de la durée de vie des vaches par rapport aux conditions d'alimentation ne sont pas connues.

Il est notoire que l'âge de reproduction chez les bovins est lié plus étroitement au poids qu'à l'âge. Deux exemples de ce principe seront traités ci-après, l'un provenant de recherches sur les génisses Hereford en Australie (Cohen et al., 1980), et l'autre déjà cité dans la figure III.10b, provenant de recherches sur les zébus peuls du delta du Niger au Mali (Wagenaar et al., 1986).

Cohen et al. ont analysé l'apparition des périodes de chaleur dans un groupe de 600 génisses d'âge approximativement identique, mais variant en poids de 130 à 376 kg, différences résultant de l'alimentation au cours de la période précédente. Ils répartirent le groupe en catégories de poids sur la base d'une différence de 10 kg, puis ils déterminèrent la fraction d'animaux en chaleur.

Les résultats de la figure III.32 montrent qu'en-dessous d'un poids d'environ 150 kg aucun animal n'était fécond, alors qu'au delà de 310 kg, presque tous les animaux avaient leur période de chaleur. On remarque que le taux d'animaux féconds augmente en flèche sur une très petite différence de poids : entre 200 et 250 kg le taux croît de 10 % à 75 %.

Figure III.32
Rapport entre la fraction de vaches zébu-peul en gestation (-----), ou fraction de vaches hereford en chaleur ([rond noir]—[rond noir]), et leur poids vif.
Zébu-peul, Wagenaar *et al.*, 1986 ; hereford, Cohen *et al.* , 1980.

Les résultats des recherches au Mali, concernant la gestation au lieu de la période de chaleur, montrent une image pratiquement identique, étant entendu que la race de plus petite taille, les zébus peuls, sont féconds avec un poids moindre.

Pour les bovins des pays sahéliens, l'âge du premier vêlage peut donc être estimé sur la base de la vitesse de croissance, jusqu'à atteinte d'un poids de 200 kg environ. Si l'on se base par exemple sur un poids de 100 kg pour un animal à l'âge d'un an et sur un gain de poids de 25 kg par la suite, le premier vêlage peut être escompté vers la cinquième année ; lorsque le gain de poids est de 50 kg par an, l'âge du premier vêlage sera de trois ans.

L'intervalle des vêlages est la période qui s'écoule entre deux naissances successives. Comme la gestation dure en moyenne plus de 9 mois, l'intervalle minimum entre les vêlages est en moyenne de 12 mois. Ceci n'est cependant possible que lorsque la gestation et la lactation ne grèvent pas de manière importante les réserves de la vache. Sous l'influence de mauvaises conditions d'alimentation, l'intervalle des vêlages peut s'étendre à 20 mois ou plus.

La relation empirique entre l'intervalle des vêlages et les conditions d'alimentation, utilisée dans cette analyse, a été établie en utilisant à nouveau la mesure précitée pour la situation des fourrages (III.3.4), c'est-à-dire le gain de poids des génisses pendant leur seconde année de vie. La figure III.33 illustre cette relation. Lorsque l'alimentation permet un gain de poids de 75 kg ou plus, pour les animaux âgés de deux ans, les vaches adultes vêleront pratiquement tous les ans (intervalles de vêlages en moyenne de 14

mois). Si les conditions sont moins favorables, l'intervalle des vêlages augmentera rapidement pour atteindre une valeur de 24 mois pour un gain de poids de 25 kg.

L'intervalle des vêlages permet de calculer le taux des vaches qui vêlent par année. Pour un intervalle de vêlages de 18 mois, ceci représente 67 % (12/18 × 100). En réalité, il s'agit là d'une surestimation, car les animaux stériles ne sont pas pris en compte lors de la détermination de l'intervalle des vêlages.

Figure III.33
Rapport entre l'intervalle de vêlage de vaches et le gain de poids des génisses, de la même population, pendant leur seconde année.

Races de bovins : n'dama, zébu-peul, zébu-azawak, West-African « Shorthorn » × azawak × n'dama, bunaji, sokoto gudali et wadara ; Bartha, 1971 ; CIPEA, 1978 ; Fall *et al.* , 1982 ; ILCA, 1979 ; Otchere, 1984, Wagenaar *et al.*, 1986 ; Wheat *et al.*, 1972 ; Wheat & Broadhurst, 1968 et Wilson, 1983.

III.3.7. Productivité des troupeaux de bovins

Il existe deux raisons de ne pas considérer exclusivement la production animale au niveau de l'animal individuel, mais également au niveau de l'animal moyen dans une population donnée. Le troupeau représente une unité spécifique, aussi bien du point de vue biologique qu'économique. Du point de vue biologique, il s'agit surtout de savoir quelles sont les prestations que l'animal individuel doit livrer pour préserver l'extinction de la population. Si cette exigence minimale est remplie, on peut se demander comment la production totale d'une population réagit face aux modifications des caractéristiques des animaux pris individuellement. Lorsque le niveau de production est faible, une amélioration de l'offre en fourrage se répercute immédiatement sur la production moyenne par animal du troupeau, par le fait qu'un certain nombre de paramètres se modifient simultanément dans le sens positif (vitesses de croissance, âge du premier vêlage, intervalle des vêlages et rendement en lait). Inversement, une détérioration des conditions d'alimentation (par exemple dégénération des pâturages) entraînera une baisse rapide de la production du troupeau. Du point de vue économique, le troupeau est l'unité la plus courante dans les systèmes d'élevage extensifs. L'exigence principale étant que cette unité soit suffisamment productive pour permettre au propriétaire et à sa famille d'avoir un revenu convenable.

Dans le cadre de ce manuel, les calculs de la productivité des troupeaux de bovins sont essentiellement utilisés pour démontrer comment les différences dans la qualité des pâturages à l'intérieur de la région entraînent des différences dans la forme, le fonctionnement et la productivité de l'élevage. Par la même occasion, il est possible de se prononcer quantitativement sur les effets des modifications dans l'offre fourragère. Les effets de la gestion du troupeau ont également été pris en ligne de compte.

Pour ces objectifs, il est nécessaire de concevoir un modèle de troupeau. Les informations nécessaires pour ce faire concernent :
- la différenciation en un nombre de classes d'âge pour les animaux mâles et femelles ;
- le taux de mortalité par classe d'âge ;

- les taux d'exploitation ;
- les taux de vêlages pour les classes d'âge fertiles.

Selon les objectifs recherchés, il devra s'agir de données obtenues sur le terrain ou de données en provenance d'ouvrages spécialisés ; une autre possibilité consiste à faire des hypothèses directionnelles pour analyser par exemple une fécondité accrue. Le calcul de la productivité du troupeau sera généralement basé sur un nombre fixe d'animaux d'année en année, ou bien sur une croissance prédéterminée ou encore sur un accroissement indéterminé. Dans tous les cas, le principe régulateur est le nombre de génisses qui atteignent la classe d'âge de la reproduction. Dans le premier cas, ce nombre correspond à celui des vaches adultes disparaissant par mortalité ou par la vente ; dans les deux autres cas, ce nombre diffère dans le sens positif (croissance de l'effectif) ou négatif (diminution du troupeau). Différents exemples sont présentés dans I.3.6 et II.5.5. Le modèle employé est analogue à celui de Dahl & Hjort (1976).

III.4. Déterminations de la capacité de charge

III.4.1. Approche

L'estimation de la capacité de charge représente un élément important dans toute évaluation de pâturage. La valeur utilitaire des pâturages naturels dépend en premier lieu de la présence d'herbivores domestiqués ou sauvages. C'est pourquoi il importe de savoir quel est le nombre d'animaux qui peut être nourri dans une région donnée : la capacité de charge représente ainsi la mesure la plus directe de la valeur utilitaire d'une région.

Il ne faut pourtant pas surestimer la valeur de ce paramètre. En effet, la production animale n'est finalement pas seulement fonction du nombre d'animaux par unité de surface, mais également fonction de leur productivité individuelle. Cette dernière grandeur est rarement prise en considération dans les évaluations de pâturages, comme il ressort de la vue d'ensemble des approches réalisées jusqu'à présent dans la pratique de l'Afrique au sud du Sahara (de Leeuw & Tothill, 1990). Ce manuel tente de porter un jugement sur la valeur utilitaire du point de vue du nombre d'animaux, et de celui de la productivité par individu. Il apparaîtra dans la suite du présent chapitre, que ce dernier paramètre est indispensable à une évaluation réaliste de la capacité de charge des pâturages sahéliens.

Le concept de capacité de charge est défini généralement selon la formulation de Boudet (1978) : « la capacité de charge d'un pâturage est la quantité de bétail que peut supporter le pâturage sans se dét ériorer, le bétail devant rester en bon état d'entretien , voire prendre du poids ou produire du lait ». Dans cette définition, les critères essentiels pour la détermination de l'occupation possible des pâturages (nombre d'animaux par ha) sont la garantie d'une utilisation durable du sol et d'une productivité du bétail bien définie.

Dans la pratique de l'évaluation des pâturages, ces critères sont souvent perdus de vue : l'occupation possible des pâturages est le plus souvent déduite directement de la biomasse existante à la fin de la

saison de croissance d'une année donnée, en supposant que le bétail puisse en consommer au maximum un tiers. Reste à savoir si l'exigence d'utilisation durable des sols et celle d'une certaine productivité animale sont remplies. Le manuel de Boudet (1978) fait ici preuve de plus de prudence. Selon ce manuel, seul un tiers de la production annuelle de la strate herbacée peut être considérée comme consommable, compte tenu des pertes de la biomasse pendant la saison sèche, les pertes de fourrage dues au pâturage et la nécessité de sauvegarder une biomasse protectrice du sol. Mais, il y est dit également que l'évaluation de la capacité de charge sur la base de la biomasse seule, n'est acceptable qu'à condition qu'il y ait possibilité de fournir un complément d'alimentation riche en azote pendant les périodes critiques. Boudet poursuit en disant qu'il serait également possible de se baser sur la disponibilité en azote du pâturage à lui seul. Ce point de vue n'est pas développé, pas plus que n'est posé la question de savoir si les restes de biomasse pour la protection du sol sont suffisants dans le cas d'une consommation d'un tiers de la production annuelle. Ce manuel ne manque pas de traiter de cet aspect (II.5.6). Ce chapitre expose les bases du concept de capacité de charge. Trois aspects seront traités :
- disponibilité du fourrage compte tenu de la production de la biomasse ;
- fraction utilisable du fourrage disponible, compte tenu des exigences de qualité découlant de la production animale souhaitée ;
- durabilité de l'utilisation des pâturages, lorsque cette fraction est effectivement ingérée annuellement par le bétail.

Cette approche ne supprime pas l'obligation d'effectuer des expériences et des tests dont Boudet souligne l'importance pour définir et vérifier plus précisément la capacité de charge ; pour cela, l'approche présentée laisse encore trop de questions sans réponse. Mais les expériences nécessaires apparaissent plus clairement (II.4.5.2) et les estimations de capacité de charge se précisent (II.5.6).

III.4.2. Production des pâturages et disponibilité en fourrage

Ce manuel indique comment déterminer la production des pâturages pendant une année quelconque, pendant une année moyenne et pendant une année sèche. La biomasse produite annuellement ne correspond cependant pas au fourrage. Pour déterminer la capacité de charge, il est néanmoins crucial de connaître la quantité de fourrage disponible et sa qualité. Cette quantité et cette qualité dépendent non seulement de la production, mais également des pertes, de l'accessibilité et de la sélectivité du bétail, cette dernière étant déterminée par la préférence et la qualité. Peut-être ces différents éléments doivent être déterminés en tant que fonction du lieu et du système de production (II.4.5.2). Pour les situations dans lesquelles ceci est impossible, certaines valeurs seront fournies pour permettre une première approche de l'évaluation globale (II.2) et semi-détaillée (II.3).

III.4.2.1. Strate herbacée

Selon Boudet (1978), la norme selon laquelle la fraction consommable représente un tiers de la production annuelle, tient compte des diverses pertes et de la nécessité de protéger le sol. Toutain et Lhoste (1978) constatent que dans le nord du Burkina Faso, le coefficient réel d'utilisation est de plus de 40 % dans le cas d'une utilisation intensive des pâturages. Compte tenu des indications en matière de

surpâturage, le coefficient de 35 % apparaît comme le plus opportun. Hiernaux (communication personnelle) conclut que dans le cas d'une exploitation continue, l'ingestion réelle représente environ un tiers de la diminution mesurée de la biomasse ; cependant, lors d'une exploitation pendant la seule saison de croissance, le coefficient est de 50 %. Les études agrostologiques de l'IEMVT sur les pâturages se basent, elles aussi, sur un degré d'utilisation plus élevé pour une exploitation pendant la saison des pluies que pour la saison sèche ou pour une exploitation continue : respectivement de 50, 25 et 33 % (Audru & Demange, 1972).

Ce manuel se base sur l'hypothèse suivante : dans le cas d'utilisation d'une fraction à ingérer de 35 % de la production annuelle pour une exploitation pendant la saison sèche et l'exploitation continue, et de 50 % pour l'exploitation pendant la saison des pluies, seules les pertes en relation directe avec la pâture sont prises en considération (par exemple piétinement suivi de mortalité, pourrissement et voracité des termites). A ces pertes viennent s'ajouter des pertes non ou difficilement évitables dues aux insectes et à d'autres petits herbivores, et des pertes moyennes dues au pourrissement, efflorescence, etc. Eventuellement, il faudra donc tenir compte séparément des feux, des sauterelles et d'autres fléaux (insectes) et de la pluviosité extrême pendant la saison sèche.

Pour les récoltes, la conservation et le stockage, les pertes sont beaucoup moins élevées, mais d'une manière générale, la qualité de la matière végétale disponible est tellement faible, que la rentabilité reste incertaine. Il n'en va pas de même pour les sous-produits agricoles de bonne qualité. Breman et Traoré (1987) supposent que 60 % de la production annuelle des fanes d'arachides et du niébé est disponible en tant que fourrage ; la disponibilité en produits dérivés du grain de céréales (son, farines basses, etc.) équivaut à 80 % de la production céréalière.

Un point exige également de retenir l'attention : la qualité de la fraction de la biomasse pouvant être ingérée, en tant que fonction de la qualité de la matière produite. Dans III.2.2.3, l'accent a déjà été mis sur le fait que les pertes d'azote ne sont pas simplement proportionnelles aux pertes de la biomasse. Pourtant, il est conseillé, en l'absence d'indications prouvant le contraire (II.4.5.2), de supposer que la qualité du fourrage disponible ne se différencie pas de la qualité de la biomasse produite. Pratiquement cela signifie que les possibilités d'ingestion du fourrage sont supposées égales aux risques de disparition par pertes dues au pâturage. Ceci peut ne pas sembler évident, compte tenu de la sélection du bétail en fonction de la qualité (II.5.6.2 et III.4.3), mais il faut être conscient que la matière de bonne qualité est également la plus sensible aux processus entraînant les pertes dues à la pâture : autres herbivores, pourrissement et efflorescence. Il suffit de penser aux trios : légumineuses - dicotylédones C_3 - graminées C_4 et tige - feuille - graine (Breman *et al.* , 1984). La sélection relative à l'appétibilité, indépendamment du taux d'azote et de la digestibilité, n'est pas prise en considération, compte tenu du conseil précité. Boudet et Leclercq (1970) en ont tenu compte pour le ranch de Niono. Ils effectuent une correction pour la production des pâturages, tout d'abord pour l'appétibilité, en considérant suivant l'unité concernée, 20 à 100 % de la strate herbacée utilisable. Ce pourcentage est ensuite multiplié par 0,3 pour estimer la disponibilité en fourrage. La fraction ingérable varie ainsi entre 6 et 30 % pour les différentes unités de paysage. La relativité du concept appétibilité et le fait que Toutain et Lhoste (1978) concluent à une ingestion maximale de 40 à 50 % ont entraîné la décision de négliger la sélection des

espèces dans ce cas précis. Il en va autrement pour les espèces ligneuses (III.4.2.2).

Les pertes, indépendamment de l'exploitation, peuvent entraîner des différences importantes de qualité entre la biomasse produite et le fourrage disponible. C'est pourquoi, il est suggéré de déterminer l'évolution de la qualité au cours de la saison sèche (II.4.5.2). Lorsque ceci est impossible, il est conseillé d'utiliser l'évolution moyenne du taux d'azote (représenté dans la figure II.16) ou encore, de tenir compte d'une diminution moyenne du taux d'azote dans le courant de la saison sèche (équation II.8). Pour des situations spécifiques, telle l'amélioration de la qualité des pâturages dominées par les graminées pérennes après des feux, on peut utiliser la figure III.34 ; pour une pluviosité tardive $\geq$ 75 mm, sur une strate herbacée (en grande partie) morte et (presque) sèche, les pertes en azote s'élèvent en moyenne à 30 % (II.3.6.4, question 8a).

Figure III.34

Evolution de la digestibilité de la matière organique et du taux de protéines des graminées pérennes au cours de l'année.

La courbe (——) présente dans les deux cas l'évolution de la biomasse principale, celle de l'hivernage. Les valeurs pour des jeunes repousses sont indiquées par des bandes hachurées. La diminution des ces valeurs, dès que les repousses vieillissent, est représentée par des flèches, suivant le cours de la courbe principale. Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 287.

III.4.2.2. Strate ligneuse

Ces considérations ne s'appliquent pas aux espèces ligneuses, car d'autres facteurs déterminent, pour celles-ci, la différence entre la production annuelle et la disponibilité en fourrage. Comme le piétinement n'est pas en cause ici, les pertes directes peuvent être négligées. L'appétibilité reste une caractéristique relative, mais l'ignorer entraîne une forte surestimation de la contribution du pâturage aérien à la situation fourragère (disponibilité et qualité du fourrage pour un système d'élevage dans une région donnée). Les bovins et les moutons n'ingèrent généralement pas de fourrage des espèces ligneuses tant que la strate herbacée est verte. Même pendant la saison sèche, la part des espèces ligneuses dans le menu n'augmente que lorsque la sélection d'un fourrage convenable à partir de la strate herbacée ou des restes de cultures, devient difficile. Diallo (1978) a constaté que sur 17 menus observés au cours d'une année de transhumance d'un troupeau de zébus dans le centre du Mali, le fourrage constitué d'espèces ligneuses n'avait une grande importance que dans le cas d'un seul de ces menus : lors de la migration vers le nord, au moment des premières pluies, le manque d'eau a entraîné le troupeau dans une région où la strate herbacée était négligeable, mais où les espèces ligneuses commençaient à bourgeonner. Ce jour là, le menu était composé pour environ 80 % de fourrage des espèces ligneuses : jeune verdure de 16 espèces différentes et feuilles sèches tombées de *Pterocarpus lucens*. Dans les autres menus, une ingestion d'un tel fourrage a été constaté dans 5 cas ; mais dans tous ces cas, il s'agissait de quantités négligeables. Leloup et Traoré (1989) ont observé, pour les bovins sédentaires dans le sud du Mali, une contribution du fourrage des espèces ligneuses dans le menu qui représentait 30 à 40 % du nombre de bouchées. Ceci était valable pour la période de février à mai dans les régions avec une strate herbacée de très faible qualité, alors que l'utilisation de pâturage aérien dans la période des pluies était négligeable.

L'ingestion du fourrage concerné s'effectuait encore sur la base d'une forte sélection, l'ingestion totale recouvrait des espèces dont l'ensemble réalisait environ 20 % de la production annuelle de feuilles, de tiges et de fruits. Geerling (comm. pers.) a constaté que pour la savane *Combretaceae* dans le centre du Burkina Faso, 15 % de la production annuelle correspondait aux espèces broutées le plus fréquemment. Ils ont observé que les chèvres préfèrent généralement les mêmes espèces que les bovins, étant entendu que les chèvres aussi composaient pendant la saison des pluies un menu caractérisé, pour une part importante, de fourrage des espèces ligneuses.

Il apparaît donc judicieux, lors de l'estimation de la situation fourragère, de ne tenir compte que des espèces ligneuses pendant la saison sèche lorsqu'ils s'agit de herbiphiles comme les bovins et les moutons ; pour les ligniphiles (chèvres et dromadaires), il faut en tenir compte également pendant la saison des pluies. Pour les herbiphiles, il faut donc connaître la phénologie des espèces ligneuses pour évaluer quelle part de la production annuelle est disponible pendant la saison sèche, et peut par conséquent être considérée comme fourrage. Les espèces individuelles présentent de grandes différences selon la période où elles portent les feuilles et les fruits ; en effet, compte tenu de leur faible qualité et des pertes importantes, les feuilles tombées sont négligées. Il existe des espèces toujours vertes telles *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis*, des espèces qui ne sont vertes que pendant la saison des pluies telles *Commiphora africana*, *Acacia albida* qui ne porte des feuilles que pendant la saison sèche, etc. Mais pour les espèces ligneuses dans leur ensemble, la quantité maximum de feuilles apparaît en août-septembre ; fin septembre, la quantité représente encore en moyenne 75 à 80 % de la production annuelle ; en octobre-novembre, elle passe à 50 % ; de décembre à février, ainsi que de mai à juin, elle est d'environ 25 % et de mars à mai 10 à 15 %. Ces valeurs pourront éventuellement être utilisées pour obtenir, à partir d'une seule ou de quelques observations personnelles, une impression de l'évolution de la disponibilité en feuilles au cours de l'année. Cette méthode est acceptable lorsqu'il est impossible de procéder à des observations supplémentaires, car les différences entre les zones climatiques ne semblent pas ici jouer un rôle. Ceci est moins étonnant qu'il n'y paraît à première vue : il est évident que le nord du Sahel est beaucoup plus sec que la savane soudanaise, mais les rares espèces ligneuses qui existent dans le nord du Sahel font partie d'espèces adaptées, et se situent aux endroits les plus favorables en matière d'approvisionnement en eau. Pour la saison sèche dans son ensemble, on peut supposer que 25 à 30 % de la production annuelle de feuilles se trouve encore sur les arbres et les arbustes. En supposant que les fruits tombés à terre, compte tenu de leur qualité, peuvent être considérés comme du fourrage (contrairement aux feuilles), ce manuel présuppose que 30 % du pâturage aérien produit annuellement, est disponible pendant la saison sèche.

Tout le pâturage aérien disponible n'est pas accessible au bétail, à moins que l'homme n'intervienne par la coupe. L'accessibilité dépend de l'espèce et de l'âge, et ceci vaut aussi bien pour les plantes que pour les animaux. Ici, 2 m est considéré comme une hauteur de pâture maximum, compte tenu de la forte dominance des bovins. Dans ces conditions, 25 % des feuilles et des tiges est accessible pour le bétail du Sahel, alors que ce pourcentage n'est que de 15 % dans la savane. Afin de tenir compte des fruits tombés à terre, cette valeur a été augmentée de 10 %. Dans les situations où les populations des espèces ligneuses sont relativement jeunes, par exemple sur les jachères où dans les cas d'exploitation intensive par l'homme et l'animal, la part de la production annuelle accessible est beaucoup plus grande. Ceci vaut pour de grandes parties de la savane, notamment lorsque la densité de la population est relativement

élevée et le cycle court. Ainsi Leloup et Traoré (1989) ont constaté une accessibilité de plus de 30 % dans les pâturages autour d'un village où 20 % des terres étaient cultivées, et une accessibilité de plus de 50 % dans une situation où presque la moitié des terres étaient déjà cultivées.

Du point de vue de la qualité, il existe des raisons d'utiliser également la préférence comme facteur de correction. Il n'existe pas de relation claire entre la digestibilité de la matière organique et le taux d'azote, alors qu'en moyenne pour un taux d'azote donné, la digestibilité est beaucoup plus faible que pour les herbacées (figure III.20f). Ceci est vraisemblablement déterminé par le taux de tanin : des mesures que nous avons effectuées ainsi que celles de Diagayété (1981) montrent que la digestibilité de la matière organique de la feuille diminue de 40 à 60 % pour un taux de tanin de $\leq$ 10 g/kg, jusque 10 à 40 % pour un taux de tanin de $\geq$ 100 g/kg. Les préférences semblent aller fortement de pair avec un faible taux de tanin, et donc avec une digestibilité relativement élevée de la matière organique (partie IV). Pour les espèces qui apparaissent en permanence dans le menu, surtout dans le menu des chèvres et des dromadaires, le taux de tanin des feuilles semble varier de 5 à 140 g/kg (en moyenne 27 g/kg) et la digestibilité *in vitro* de la matière organique de 37 à 75 % (en moyenne 52 %). Dans les espèces sélectionnées uniquement dans le cas de manque de nourriture, le taux de tanin des feuilles semble varier de 10 à 260 g/kg (en moyenne 120 g/kg) et la digestibilité de la matière organique de 14 à 48 % (en moyenne 35 %).

Le grand étalement et le chevauchement de ces chiffres signifie que la mesure du taux de tanin ne peut constituer une alternative pour l'étude des préférences et de la digestibilité de la matière organique. Quelques exemples permettent encore d'en fournir l'illustration : les feuilles d'une espèce broutée fréquemment par les chèvres telle *Acacia seyal*, présentent un taux de tanin d'en moyenne 140 g/kg, alors que celui d'une espèce ingérée seulement dans des conditions défavorables comme *Guiera senegalensis* est d'à peine 40 g/kg. La feuille de *Pterocarpus lucens* avec un taux de tanin de moins de 10 g/kg présente une digestibilité de la matière organique d'à peine plus de 45 %, celui d'*Acacia seyal* (avec un taux en tanin de 140 g/kg) de presque 60 %.

Il ressort de ces chiffres que la digestibilité moyenne de la matière organique des espèces appétées est un peu plus faible que celle du fourrage sélectionné par les bovins dans la strate herbacée (tableau III.14). La digestibilité des espèces consommées uniquement dans des circonstances défavorables est beaucoup plus faible (35 contre 56 %). S'ajoute à cela qu'à la différences des espèces herbacées, la digestibilité des protéines peut être faible pour les espèces ligneuses (Richard, 1983). Le manque actuel de compréhension a mené à l'approche pragmatique suivante :
- Pour les évaluations globales de la situation fourragère et de la capacité de charge, la disponibilité du fourrage des espèces ligneuses est seulement prise en compte pendant la saison sèche. On distingue deux situations : la disponibilité fourragère ne tenant pas compte du pâturage aérien, soit une sous-estimation (vraisemblablement légère) de la disponibilité pour les herbiphiles, et la disponibilité fourragère comprenant feuilles, tiges et fruits de toutes les espèces ligneuses, soit une surestimation (probablement importante) de la situation des ligniphiles. Pour un cheptel mixte, une moyenne pondérée peut ensuite être calculée sur la base de la répartition des herbiphiles et des ligniphiles exprimée en UBT.
- Pour des estimations plus précises, seules les espèces ligneuses broutées tout au long de l'année, au

moins par les chèvres et les dromadaires, doivent être considérées comme fournisseur de fourrage (partie IV). Pour les herbiphiles, seule la disponibilité pendant la saison sèche est prise en compte, alors que pour les ligniphiles la disponibilité est prise en compte sur toute l'année.

Pour comprendre le rôle joué par les espèces ligneuses dans la situation fourragère, et donc pour estimer la capacité de charge, il faut tenir compte du fait que par suite des préférences, le fourrage des espèces ligneuses disponible a une autre qualité que celle du total des feuilles, des tiges et des fruits. Pour les valeurs moyennes de la digestibilité et du taux d'azote des feuilles, ceci avait déjà été souligné. L'analyse de 36 des espèces les plus courantes permettra d'entrer plus dans les détails.

Pratiquement la moitié des espèces appétées sont des légumineuses, les espèces non appétées n'en comportent même pas 30 %. Les plus intéressantes du point de vue qualitatif, sont cependant les espèces de la famille *Capparidaceae*. Plusieurs espèces se rencontrent, mais leur contribution à la disponibilité fourragère est presque toujours limitée, car elles sont intensivement exploitées et n'ont pratiquement pas de possibilité de s'installer, de se développer, et de croître.

Bien qu'il existe presque autant d'espèces appétées que d'espèces non appétées, ceci ne fournit donc aucun renseignement quant à leur contribution respective à la production du pâturage aérien. C'est dans le Sahel que le nombre des espèces appétées est le plus grand, et dans la savane qu'il est le plus petit suivant le tableau III.17. Ce tableau montre également que le taux d'azote des feuilles des espèces appétées est beaucoup plus élevé que celui des espèces non appétées, alors qu'il est plus élevé pour les deux groupes dans le Sahel que pour ceux de la savane. Pour estimer la contribution des espèces ligneuses à la situation fourragère dans la savane, les valeurs moyennes de la digestibilité de la matière sèche sont déduites des taux d'azote pendant la saison sèche. Le taux d'azote pendant la saison sèche est supposé égal à la moyenne de toutes les feuilles et des vieilles feuilles. Pour les espèces appétées, il s'agit de 19 g/kg et pour les espèces non appétées de 17,5 g/kg. La digestibilité de la matière organique est alors respectivement de 42 et 30 % (figure III.20f), donc la digestibilité de la matière sèche est 43 et 35 % (tableau III.13).

Tableau III.17
Nombre d'arbres et d'arbustes préférés et non préférés, avec le taux d'azote de leur feuilles (g/kg), par classe d'âge et zone climatique.

	feuilles préférées				feuilles non préférées			
	n*	jeunes	toutes	vieilles	n*	jeunes	toutes	vieilles
Sahel	13	35	29	21	10	27	22	17
savane	7	27	24	14	11	24	20	15
total	19	32	27	18	17	26	21	16

* nombre d'espèces présentes ayant eu chacune avant la sécheresse au moins un recouvrement de 0,5 % dans une des

principales zones agroécologiques de II.2.2.3.

Dans l'hypothèse où la totalité du menu serait constituée par les feuilles d'espèces ligneuses d'une telle qualité, comme cela peut se produire dans certaines conditions pour les chèvres, l'ingestion de matière sèche digestible selon le tableau III.16 serait respectivement de 46 et 40 g/kg^{0,75} par jour. Si les taux trop élevés en tanin n'avaient pas d'effet négatif (sans doute une supposition trop optimiste), l'ingestion se situerait, même dans le dernier cas, encore juste au-dessus du niveau d'entretien (36 g/kg^{0,75} par jour ; III.3.2). Ceci ne vaut pas pour les herbiphiles, qui ont plus de difficultés de digestion en présence de tanins (Hofmann, 1973) quand, dans le cas de manque de fourrage herbacé de qualité, ils ingèrent du fourrage des espèces ligneuses. Un exemple est constitué par la situation en savane pendant la saison sèche où les graminées pérennes ont disparu. La strate herbacée présente un taux d'azote de 3,5 g/kg (tableau I.22) et une digestibilité de la matière sèche de 34 % (tableau III.13). Au début les bovins parviennent encore à sélectionner plus d'un dixième avec un taux d'azote de 7 g/kg et une digestibilité de 45%. L'ingestion de matière sèche digestible de 32 g/kg^{0,75} par jour, est alors déjà en-dessous du niveau d'entretien. Lorsque la sélection n'est plus possible, et que le fourrage ingéré est donc de qualité moyenne, l'ingestion est de 19 g/kg ^{0,75} par jour (tableau III.16). Dans ces situations, les herbiphiles se tournent de plus en plus vers le pâturage aérien. L'adjonction au menu de feuilles d'espèces appétées avec un taux d'azote moyen de 19 g/kg et une digestibilité de la matière sèche de 42 %, améliore tout autant l'ingestion de matière sèche digestible que l'ingestion d'azote. Lorsque le menu est composé pour un tiers de pareilles feuilles, le taux moyen d'azote atteint 8 g/kg et la digestibilité de la matière sèche 36 % ; l'ingestion de matière sèche digestible s'élève alors à 26 g/kg^{0,75} par jour, ou bien une ingestion de matière sèche de 4,6 kg/jour par UBT.

Les espèces non appétées ne présentent pas de digestibilité plus élevée que la strate herbacée, et puisque l'ingestion d'énergie est un facteur limitatif, le taux d'azote plus élevé de ces espèces ne présente pas d'avantages. Il s'agit là d'un argument supplémentaire en faveur de l'approche suggérée précédemment pour inclure le pâturage aérien dans l'estimation de la capacité de charge. Compte tenu de la petite différence de taux d'azote pendant la saison sèche entre les espèces appétées et les espèces non appétées, et compte tenu de l'absence de précision pour les autres paramètres, il est vain, lors de l'estimation globale de la situation fourragère, de considérer les préférences comme critère pour déterminer la qualité du pâturage aérien. C'est pourquoi les taux moyens d'azote de toutes les espèces ligneuses ont été utilisés (I.3 , II.2 et II.3). Mais pour les estimations plus précises, où seules les espèces appétées comptent, il faut utiliser le tableau III.17 ou alors, lorsque la contribution du pâturage aérien au menu est spécifiée, il faut utiliser les données relatives aux espèces de IV (ou encore des analyses personnelles).

Le danger de surestimer la qualité du fourrage ingéré subsiste encore, lorsque, comme dans les exemples ci-dessus, seule la feuille est prise en considération. Les fruits qui sont consommés en quantités relativement importantes, présentent un taux d'azote moyen de 21 g/kg, par rapport à 29 g/kg pour les feuilles des espèces appétées. Pour les fruits et les feuilles des espèces non appétées,il s'agit respectivement de 18 et 22 g/kg. Lors de la consommation des feuilles, il y aura également ingestion des tiges, ce qui continue à influencer négativement la qualité.

III.4.3. Production animale visée et capacité de charge

Pour l'estimation de la capacité de charge, il faut tenir compte de la disponibilité et de la valeur de la biomasse annuelle en tant que fourrage. Ce dernier aspect a déjà été traité brièvement ci-dessus lors de l'analyse des préférences par rapport aux espèces ligneuses. La valeur nutritive semblait alors liée positivement aux préférences.

Les différences dans la qualité du fourrage auxquelles le bétail est confronté dans la région, peuvent par exemple faire varier le gain de poids annuel des bovins de 0 à 100 kg (I.3.5). La situation extrême avec absence de production ne peut bien entendu être l'objectif de l'élevage. Comme pour les populations d'herbivores sauvages, la productivité moyenne en termes de croissance et de fécondité doit se situer au-dessus d'un minimum biologique afin d'assurer la survie.

La fécondité minimum qui garantit la survie (reproduction) d'un troupeau peut être caractérisée : par l'âge des animaux femelles lors du premier vêlage, par les intervalles entre les vêlages ou le taux de vêlages, et par la durée de vie des animaux femelles. Pour les bovins de la région, les valeurs limites sont les suivantes : les vaches doivent vêler pour la première fois aux environs de leur sixième année au plus tard, elles doivent ensuite vêler tous les deux ans et présenter une espérance de vie de 11 ans. Au total, la vache vêlera alors trois fois et la proportion de velles sera de 50 %. Sur le nombre total de veaux, 2/3 au maximum atteindront l'âge adulte ; donc une vache qui meurt après la naissance de trois veaux sera tout juste remplacée.

Dans une telle situation, la croissance nette de velles entre la première année et la première fécondation devra être de 25 à 30 kg de poids vif par an et par animal. On suppose qu'un veau qui atteint juste l'âge d'un an pèse 80 à 100 kg, alors que la première fécondation peut intervenir lors de l'atteinte d'un poids vif de 180 à 200 kg (figure III.31). Un gain de poids annuel de 25 à 30 kg de poids vif ne présente pas un problème dans le nord du Sahel, compte tenu de la valeur fourragère des pâturages. Cela ne représente pas un problème non plus pour une pluviosité annuelle > 1200 mm à cause de la durée de la « saison verte » (tableau I.22). Mais le faible taux d'azote de la strate herbacée rend impossible une telle croissance sur la base de la qualité moyenne des pâturages de la zone à une pluviosité annuelle située entre 300 et 1200 mm, là où se situe la plus grande partie du bétail. Même une sélection du fourrage assurant un taux d'azote minimum de 7 g/kg pendant toute la saison sèche, entraînera au maximum un gain de poids de respectivement 5 et 15 kg par an pour une génisse dans le sud du Sahel et dans le nord de la savane (tableau I.22). Pour obtenir un gain de poids net de 25 à 30 kg, il faudrait que dans le sud du Sahel le bétail sélectionne un fourrage avec un taux d'azote de 8,5 g/kg pendant 5 à 6 mois sur les neuf mois que dure la saison sèche, ce qui permettrait le maintien du poids, au lieu d'une perte de 4 kg/mois. Dans le cas du nord de la savane, il faudrait que cette sélection s'effectue pendant 3 à 4 mois, sur les 8 mois que dure la saison sèche. C'est pourquoi dans ce manuel, le critère pour le fourrage est fixé à un taux d'azote minimum de 7,5 g/kg pour la strate herbacée des pâturages naturels. Ce n'est que lorsque le fourrage des espèces ligneuses recherchées, ou les sous-produits agricoles de bonne qualité, sont suffisamment disponibles pour améliorer de manière substantielle le taux d'azote moyen de l'offre totale, qu'une partie de la biomasse de la strate herbacée avec un taux inférieur à 7,5 g/kg est considérée comme

utilisable.

La figure II.21 permet de déduire quelle fraction du fourrage disponible est réellement utilisable sur la base du critère d'un taux minimum d'azote de 7,5 g/kg dans le menu. Lorsque des données détaillées sur l'évolution de la qualité du fourrage pendant l'année (II.4.5) sont disponibles, il est possible d'évaluer le gain de poids potentiel pendant la période des pluies avec une plus grande précision qu'à l'aide du tableau I.22. Il est alors également possible de préciser l'exigence minimum ci-dessus. La figure II.20 a été réalisée pour cette raison : elle comprend une évaluation de la fraction de la biomasse qui correspond au critère du taux d'azote de 7 ou 8 g/kg pour un taux d'azote moyen donné. Lors de la réalisation de ce tableau, deux hypothèses ont été formulées :
- d'une manière générale la biomasse peut être subdivisée en deux composants : l'un de qualité relativement faible (tige) et l'autre de qualité relativement élevée (feuille, graines) ;
- le composant de faible qualité présente un taux d'azote de 3 g/kg, et l'autre de 10 g/kg.

A partir de ces hypothèses, les mesures et les calculs de la fraction supérieure à un taux d'azote égal à 7 ou 8 g/kg semblent bien correspondre. La figure II.20 montre que pour un taux d'azote moyen de par exemple 4 g/kg, 25 % de la biomasse présente en moyenne un taux d'azote de 7 g/kg. Si le critère est de 8 g/kg, 20 % de la biomasse y répondra encore.

La norme utilisée ci-dessus concernant le minimum du taux d'azote de la ration de saison sèche, est déduite de données relatives aux bovins. Pour les moutons la norme sera pratiquement identique : ce qui est essentiel c'est que pour les deux catégories, une ration d'un taux d'azote inférieur à 8,5 g/kg entraîne chez les animaux un bilan négatif d'azote et d'énergie. Cet état des choses n'est que partiellement admissible pendant la saison sèche. C'est pourquoi on suppose ici que la norme mentionnée vaut pour la totalité de la population de bétail et peut donc être utilisée pour des estimations de la capacité de charge sans spécification de l'espèce animale.

Les ruminants se différencient cependant dans la mesure où ils broutent sélectivement les meilleurs composants d'une végétation ; grâce à leur anatomie, les petits ruminants tels que les moutons et les chèvres sont à cet égard plus avantagés que les bovins. La mesure de sélectivité possible pour les bovins, dépend surtout de la répartition dans l'espace des composants et de la concentration des composants de bonne qualité (par exemple légumineuses ou autres dicotylédones) à certains endroits.

Lorsque la quantité utilisable de fourrage a été déterminée par la figure II.21 ou II.20, il est possible de calculer sur cette base l'occupation maximum garantissant le maintien du troupeau, mais non une production de viande significative, et encore moins une production de lait. C'est ainsi qu'est déterminée la capacité de charge formulée dans II.5.6.2 . Parce qu'il s'agit là de l'occupation maximum possible, alors que les conditions dans lesquelles cette occupation peut être réalisée dans la pratique de l'élevage ne sont pas encore formulées (II.5.6 et III.5.3), la partie I utilise le terme de capacité potentielle de charge.

Pour les estimations globales, la fraction utilisable du fourrage disponible est estimée suivant la méthode

mentionnée, sur la base du taux d'azote moyen pendant la saison sèche. Cela veut dire que le taux à la fin de la saison de croissance doit faire l'objet d'une correction, à la suite de la perte d'azote pendant la saison sèche (équation II.8). Lorsqu'il existe suffisamment de données exactes sur l'évolution de la quantité de biomasse et sur la qualité pendant la saison, il est possible de déterminer la fraction utilisable par saison ou même par mois ; ensuite la moyenne (pondérée) peut être calculée. Cela concorde avec l'hypothèse selon laquelle les pâturages sont subdivisés en blocs, et que chaque bloc a sa propre saison ou mois de pâture. Lorsque dans la réalité il est question d'une pâture incontrôlée, la méthode de calcul utilisée entraînera une surestimation de la capacité de charge. Au fur et à mesure d'une gestion plus consciente de l'élevage, la capacité de charge estimée se rapprochera plus de la réalité. Dans le cas d'une telle gestion, il est bon de tenir compte des différences de pertes de fourrage dues au pâturage, en fonction des pâturages et de la saison (II.4.5.2).

Ce manuel traite longuement de la forte variabilité de la pluviosité d'une année sur l'autre et de la variabilité qui en résulte pour la croissance de la végétation (I.2.4 ; II.2.2.4). A cet égard, une réponse a déjà été apportée à la question sur la situation qui doit constituer le point de départ pour l'estimation de la capacité de charge : une année avec une pluviosité moyenne ou bien une année sèche (I.3.4 ; II.5.6.3). On peut s'attendre à ce que, dans le premier cas, il y ait des manques de fourrage pendant la moitié de ces années. Il est peu probable que les effets négatifs de ces déficits sur la production puissent être compensés par une meilleure croissance et une plus grande fertilité pendant les années à pluviosité forte, car à mesure que la disponibilité en eau augmente, la qualité du fourrage diminue. De plus, la sécheresse entraîne une mortalité accrue, et compte tenu du redressement relativement lent des populations de grands herbivores, il reste à savoir si une population atteindra jamais l'ampleur rendue possible par une année moyenne ou humide. La situation d'une année quelconque ayant servi à des mesures de biomasse, n'apparaît pas non plus comme un bon choix. Il semble plus opportun de tenir compte de la situation moyenne ainsi que du retour régulier des années sèches, et de tenir compte de ces effets sur la capacité de charge des pâturages et finalement sur tout le fonctionnement du secteur de l'élevage. La définition d'une année sèche est quelque peu arbitraire : ici le critère choisi est une quantité de précipitations annuelles avec une probabilité de 10 %.

Pour la savane, surtout pour la partie méridionale, il n'est pas vraiment nécessaire de tenir compte des années sèches pour le calcul de la capacité de charge : la variabilité de la pluviosité y est relativement limitée, et comme la disponibilité en éléments nutritifs détermine notamment la production, cette variabilité a peu d'influence sur la disponibilité fourragère. En prenant en considération les exigences de qualité dans l'évaluation de la capacité de charge (en fonction de l'objectif de production), le fourrage utilisable dans la savane est estimé à une plus petite fraction pour les années normales que lorsque la disponibilité pendant les années sèches constitue la base de l'évaluation.

Dans II.5.6.3, il a déjà été dit que le choix de la limite entre le Sahel et la savane comme transition entre une capacité de charge déterminée par les années sèches et celle déterminée par les exigences de qualité, est quelque peu arbitraire. La transition est déterminée par la variabilité de la production (compte tenu de la pluviosité), par le taux d'azote de la strate herbacée et par la présence et l'utilité du pâturage aérien. La méthode présentée pour l'évaluation des pâturages permet de déterminer soi-même quel critère permet

d'obtenir une capacité de charge fiable pour un pâturage donné (du point de vue de la production animale et/ou du milieu). Il faut alors savoir si la production fourragère d'une année sèche divisée par celle d'une année normale (II.2.2.4) donne une valeur moindre que la fraction utilisable du fourrage disponible dans une année normale, compte tenu de l'objectif de production (II.4.5.2 ; II.5.6.3). Par une meilleure mise à profit du pâturage aérien et l'influence exercée ainsi sur le taux d'azote du menu pendant la saison sèche, la limite pour les chèvres se situe par exemple plus au sud que pour les bovins ; dans le cas des chèvres, il est indiqué également pour la savane de prendre la disponibilité en fourrage d'une année sèche comme la base de la capacité de charge.

La capacité de charge maximale, traitée précédemment, peut sembler une caractéristique utile pour la comparaison des pâturages, mais elle ne peut être utilisée pour les objectifs de gestion, car seul le maintien du troupeau a servi de critère. L'élevage poursuit cependant un objectif de production bien déterminé : dans les systèmes pastoraux, il s'agit de produire une quantité suffisante de lait par animal pour constituer des surplus destinés à la consommation humaine ; dans une entreprise de viande, il s'agit d'atteindre un poids d'abattage en l'espace d'un temps donné. Si l'offre fourragère ne permet pas une telle productivité, un tel système d'élevage n'est pas viable sur le plan économique. En fonction de l'objectif de production et de la productivité souhaitée, l'alimentation doit répondre à certaines exigences : en général ces exigences sont plus élevées pour les systèmes destinés à la production de lait que pour ceux destinés à la production de viande ; pour ceux destinés à la force de traction, ils se situent encore plus bas et pour ceux destinés à la production de fumier encore plus bas. Les exigences en matière de fourrage pour ce dernier objectif de production sont identiques à ceux utilisés pour le calcul de la capacité de charge maximum. Plus les exigences en matière d'alimentation sont élevées, plus petite sera la partie du fourrage disponible utilisable, et plus le nombre d'animaux qui pourront être gardés sera bas. En d'autres termes, pour des systèmes très productifs, la capacité de charge est plus faible que pour ceux à faible productivité : la capacité de charge doit être définie par rapport à la spécificité du système.

Lorsqu'il existe des données précises sur la situation fourragère, il faut également tenir compte du fait que l'ingestion de nourriture augmente lorsque la qualité du fourrage augmente, ce qui permet une production animale plus élevée (tableau III.15). Le tableau I.24 montre une variation dans l'ingestion de matière sèche allant de 2,2 à 2,4 % du poids, et ceci pour différents systèmes qui semblent représentatifs de la situation actuelle.

La disponibilité totale en fourrage détermine si les exigences fourragères spécifiques peuvent être remplies pour chaque objectif de production. La capacité de charge d'une zone de pâturages doit pour cela être jugée en relation avec la disponibilité et l'accessibilité d'autres régions ou par rapport à d'autres moyens d'alimentation (sous-produits agricoles, concentrés, cultures fourragères). Pour faire entrer en ligne de compte ces différents composants de manière pratique, il est conseillé de faire une description particulière du fourrage disponible dans les champs et les pâturages naturels. Pour les champs, il faut distinguer entre les sous-produits de mauvaise qualité telle la paille, qui est souvent abandonnée après la récolte, et les sous-produits de grande qualité telles les graines de coton, les farines basses, les fanes d'arachides et de haricots. Pour les pâturages naturels, il faut décrire séparément la strate herbacée et les espèces ligneuses. De cette manière la situation fourragère peut être décrite pour différents systèmes

d'élevage, et la capacité de charge correspondante peut être calculée, par composition de différents menus. Pour les systèmes pastoraux, sans accès aux champs et sans les moyens nécessaires à l'achat de produits agro-industriels, seuls les pâturages naturels sont disponibles. La proportion de chèvres ou de dromadaires dans les troupeaux détermine dans quelle mesure on peut profiter du pâturage aérien. La capacité de charge pour les systèmes transhumants et sédentaires peut être comparée en déterminant pour un même objectif et niveau de production, la fraction utilisable du fourrage disponible pour un ensemble de pâturages ou pour un pâturage isolé. Un exemple est exposé dans II.5.6.3 . Les systèmes agro-pastoraux peuvent disposer de sous-produits agricoles. Mais un agriculteur peut par exemple décider de vendre ses graines de coton avec le coton, de donner aux poules les farines basses en provenance des céréales consommées par sa famille, et de destiner les fanes d'arachides et d'haricots uniquement à l'embouche des moutons.

Dans ce qui précède, on suppose qu'une occupation plus faible des pâturages entraîne automatiquement une sélection plus forte et donc une production plus élevée. Dans II.5.6.3 est exposé comment déterminer sur cette base la production animale optimale. Il apparaît ainsi que pour le ranch de Niono, le doublement de la vitesse de croissance des génisses (50 au lieu de 25 kg/animal par an) est jugée possible à condition d'agrandir la superficie disponible en passant de 2,8 à plus de 3,1 ha/UBT. Pour un système d'élevage dont l'objectif principal est la production de viande, la production annuelle de viande pour tout le troupeau s'élèvera de 22 à 40 kg/animal (figure II.22a), ou de 37 à 58 kg/UBT (tableau I.24, situations I et IIa). La production par hectare augmenterait donc de 37 : 2,8 = 13 vers 58 : 3,1 = presque 19 kg/ha. S'ajoute à cela dans le dernier cas une production de lait exploitable de 64 kg/animal (figure II.22b), ou bien de 92 kg/UBT (tableau I.24, situation IIa), donc de 92 : 3,1 = 30 kg/ha. L'occupation moindre des pâturages résulte donc en une production beaucoup plus élevée de protéines animales par hectare. Ceci semble parler en faveur d'une réduction de l'occupation des pâturages supérieure à celle de l'exemple choisi.

Ces considérations théoriques montrent que la production par hectare peut être très sensible aux légères différences dans l'occupation, alors que la production secondaire maximum par ha peut aller de pair avec un degré d'utilisation faible de la biomasse présente. Ceci semble en opposition avec la logique : en effet on s'attend à un rendement animal plus élevé par kg de matière végétale, lorsqu'un maximum de cette matière est ingéré par le bétail. Ce raisonnement ne se vérifie pas lorsqu'une grande partie de la biomasse est de mauvaise qualité, et ceci a également été démontré lors d'expériences d'alimentation en étable sur des moutons (Zemmelink, 1986). En fonction du type de fourrage grossier, la production la plus élevée par kg de fourrage a été obtenue pour une utilisation de 45 à 85 %. Pour un essai alimentaire en étable, cela signifie que 15 à 55 % de l'offre journalière sont évacués comme fourrage restant. Pour un essai de pâture, cela signifierait qu'au profit d'une production élevée par ha, seule une petite partie de la biomasse serait consommée par le bétail. Il y a peu d'exemples concrets pour la situation de pâture.

Il faut cependant être conscient qu'il existe également des limites aux possibilités d'atteindre des productions plus élevées par ha par le biais de l'abaissement de l'occupation des pâturages. Quatre causes sont analysées consécutivement.

Il existe des limites physiques aux possibilités de sélection de l'animal. Diallo (1978) a constaté que pour les zébus, le taux d'azote du menu au cours de l'année était supérieur de 0 à 10 g/kg à celui de la végétation présente. Pour le même troupeau, on a démontré que, pendant la saison sèche, il avait beaucoup de mal à sélectionner de la matière de qualité raisonnable à partir de graminées cespiteuses ; les feux augmentaient l'accessibilité avec un facteur trois (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 349). Les moutons et les chèvres ont un plus grand pouvoir de sélection que les bovins. C'est vraisemblablement une des raisons pour lesquelles le code pastoral des Peuls dans le centre du Mali prescrit que le petit bétail doit suivre le gros bétail lors des déplacements des troupeaux.

La différence minime de qualité entre les plantes et les parties de plantes dans une région déterminée fait qu'à un certain moment, la production animale diminuera proportionnellement à l'occupation décroissante. La qualité de la meilleure matière qui puisse être sélectionné, déterminera la production maximum par animal. Mais cela ne signifie pas que la production maximum par ha pourra être atteinte en adaptant l'occupation des pâturages à la disponibilité de la meilleure fraction de fourrage. Le temps limité disponible pour la sélection et les pertes d'énergie, allant de pair avec la nécessité des déplacements fréquents, rendent ceci impossible.

Dans de grandes parties du sud du Sahel et de la savane, la qualité moyenne des pâturages est tellement faible à cause de la mauvaise fertilité du sol, que lorsque la production baisse par suite de dégradation du sol, la qualité augmente, ainsi que la fraction exploitable (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 363).

Un aspect concernant l'élevage transhumant clôturera cette liste. L'occupation maximum d'un pâturage spécifique dans une série de pâturages exploités les uns après les autres au cours de l'année, peut signifier une forte sous-occupation de ces autres pâturages (II.5.6.4).

III.4.4. Production durable

Un des aspects de la définition de la capacité de charge cité dans III.4.1 n'a pas encore été traité, à savoir que le pâturage ne doit pas souffrir de l'exploitation. La durabilité du système de production signifie pour l'élevage, le maintien à long terme d'une végétation productive avec une composition souhaitée des espèces. Dans la pratique, ceci signifie la prévention des phénomènes suivants : érosion et dégradation du sol (dont encroûtement), épuisement chimique et modifications non désirées de la composition des espèces, occasionnées par l'exploitation.

En d'autres termes, l'utilisation des pâturages ne doit pas engendrer une diminution de la quantité d'eau infiltrée I , ni une modification des paramètres des équations II.15 (B) et II.5 (N_b) entraînant une diminution de B et de N_b ni encore un changement du caractère de la biomasse qui ferait de $f_é$ une plus petite partie de f (III.2.2.2). Ces aspects seront analysés brièvement l'un après l'autre. Pour des informations plus détaillées, prière de se référer à Penning de Vries & Djitèye (1982 : pp. 357-384).

III.4.4.1. Disponibilité en eau

La condition interdisant la diminution de la capacité d'infiltration, signifie une interdiction de toute augmentation du compactage superficiel et du ruissellement. Les sols qui présentent une sensibilité de cet ordre, sont ceux situés sur un substrat limoneux. Le risque s'amenuise au fur et à mesure d'une plus grande présence de biomasse protectrice. Les auteurs de ce manuel ne connaissent pas de recherches dans lesquelles apparaissent des estimations plus précises que les indications globales de l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye (1982 : p. 359). Dans cet ouvrage, il est dit que les sols les plus sensibles à l'encroûtement doivent présenter au minimum 2500 kg/ha de matière sèche pour 700 mm/an ou plus de pluviosité, 2000 kg pour 500 mm et 700 kg pour 250 mm. L'énergie cinétique de la pluie est un facteur important dans le processus de compactage superficiel, c'est pourquoi les arbres sont moins efficaces en tant que protection que la strate herbacée, alors que la paille couchée est plus efficace qu'une végétation debout. Les quantités nécessaires de biomasse sont si grandes en comparaison avec la production annuelle, qu'il ne peut pratiquement pas être question de pâture, si l'on prend au sérieux le critère de durabilité (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 336). Les critères cités dans III.4.2.1 pour la disponibilité en tant que fraction de la production annuelle entraînent ainsi pour les sols sensibles à l'encroûtement une surestimation dangereuse. Il en va de même pour les estimations de capacité de charge basées sur la production des pâturages d'une année moyenne, car cela signifie dans la pratique qu'au cours de la moitié des années, une trop petite quantité de biomasse sera préservée. Le compactage superficiel qui en découle, le ruissellement accru qui va de pair et l'érosion en nappe, sont des processus difficilement et lentement réversibles. Parallèlement à l'argument de production animale (III.4.3), il y a donc pour les sols sensibles à l'encroûtement également des raisons écologiques pour baser la capacité de charge sur la situation d'une année sèche.

Il y a quand même un point positif parmi les aspects négatifs concernant les sols sensibles à l'encroûtement. La redistribution naturelle de l'eau de pluie, assure une infiltration locale relativement profonde, ce qui fait que les graminées pérennes et les espèces ligneuses bénéficient sur ces sols d'un plus grand pouvoir concurrentiel que sur les sols à infiltration homogène. Sur ces sols sensibles à l'encroûtement (et dans les dépressions), ces groupes d'espèces ont leur répartition la plus septentrionale. Pour des conditions écologiques comparables, leur biomasse est plus élevée que celle des espèces annuelles (III.2.5) ; c'est pourquoi il est peut être possible d'exploiter de manière durable mais à échelle réduite les sols sensibles à l'encroûtement. La pression d'exploitation sur les espèces pérennes doit alors être suffisamment faible pour que leur survie ne soit pas mise en danger (voir ci-après).

III.4.4.2. Disponibilité en éléments nutritifs

Dans II.5.6.4, le compactage superficiel et le ruissellement accru qui en résultent sont présentés comme la menace principale pour la durabilité. L'épuisement du phosphore est considéré comme le facteur le moins important parmi ceux qui doivent déterminer les normes de l'environnement. L'épuisement d'azote n'est même pas mentionné. Et cela alors que le manuel considère que la disponibilité en azote et en phosphore est plus fondamentale que la disponibilité en eau ! Les pertes d'azote sont quand même prises en considération par l'intermédiaire du facteur f dans l'équation N_b ; en effet, l'estimation de la production fourragère en dépend. Une attention toute particulière a déjà été accordée (surtout par rapport

à la capacité de charge) à ces pertes au moment de l'analyse de la disponibilité fourragère par rapport à la production (III.4.2).

L'épuisement du phosphore et des autres minéraux ne constitue pas le facteur le plus critique par rapport à la durabilité, car le processus s'effectue assez lentement, et les mesures correctives sont relativement aisées à prendre. Dans l'état actuel des productions animales, le transfert réel de phosphore hors d'un complexe de pâturages est limité. Le déplacement centripète du phosphore en direction d'un point d'abreuvement ou d'un corral peut cependant entraîner localement des pertes de l'ordre de 100 g/ha par an (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 254-255). Ceci ne doit pas obligatoirement avoir des conséquences directes sur la production animale, à moins que les endroits enrichis soient dénudés ou bien recouverts d'une végétation d'espèces non appétibles. Puisqu'il n'est pratiquement pas question d'apport de phosphore en provenance de sources externes, un élevage rentable semble impossible sans engendrer une hétérogénéité croissante. Une bonne gestion permet cependant d'en limiter les effets négatifs (II.5.6.4). Dans le cas d'un échec, un bloc de sel et une application d'engrais phosphaté permettront d'améliorer la situation de manière plus aisée et moins coûteuse que dans le cas de sols compactés superficiellement et dégradés par l'érosion.

L'effet du déplacement du phosphore par l'intermédiaire de l'érosion est plus important que lorsque le transport s'effectue par l'intermédiaire du bétail. Le long d'un axe de transhumance qui a vraisemblablement été utilisé de manière intensive depuis 50 ans, les mesures de phosphore à la fin de la saison de croissance, ont révélé deux fois plus de phosphore dans la strate herbacée proche d'un point d'abreuvement qu'à une distance de 1 km (2,0 contre 0,9 kg/ha). Par contre, les mesures de phosphore dans deux dépressions à concentration des écoulements, ont révélé 14 fois plus de phosphore que sur les sols compactés superficiellement environnants à fort ruissellement (4,3 contre 0,3 kg/ha). Pour une unité de pâturage comparable mais non exploitée et non dégradée, les résultats étaient de 1,5 kg/ha dans la strate herbacée de la dépression contre 1,0 kg/ha dans la végétation du pâturage environnant (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 362-363). Une diminution de l'infiltration par suite de compactage superficiel s'étendant sur de grande étendues, va de pair avec des pertes localisées d'eau par percolation. Par conséquent, le risque de pertes réelles de phosphore et des autres éléments par percolation, est très important dans les dépressions, notamment lorsque les graminées pérennes et les espèces ligneuses ne peuvent s'y maintenir à cause de la pâture.

Un autre cas d'épuisement du sol sous l'influence de pâture se présente dans le cas d'intégration de l'agriculture extensive et l'élevage extensif. Il y a alors collecte active de fumier, qui sera utilisé aux endroits où le bétail ne pourra pâturer qu'après enlèvement des parties végétales de haute qualité, c'est-à-dire sur les champs. L'évacuation des éléments nutritifs est alors beaucoup plus importante que dans le cas de pâture. Il en va de même lors de la fauche des pâturages et de la conservation sous forme de foin ou d'ensilage. Il s'agit là de la méthode idéale pour diminuer la différence entre la production fourragère et la disponibilité du fourrage, (voir II.4.2.1), mais la pression d'exploitation s'en trouve fortement augmentée. Dans ces conditions, en l'absence d'apport d'engrais aux champs et aux prairies de fauche, l'azote et le phosphore peuvent devenir limitatifs, mais également K, S et d'autres éléments. Ce manuel a essayé de tenir compte de ce phénomène en identifiant puis en évaluant individuellement des jachères

épuisées (II.3.6.2 ; question 1d). Ces calculs distinctifs de capacité de charge n'ont de sens qu'à condition de tenir compte de la capacité de charge du système dans son ensemble et à condition que la conception de la gestion des pâturages ait été telle que l'intensité d'exploitation varie en fonction de la capacité de charge de chaque unité.

L'épuisement des éléments nutritifs entraîne une telle modification des valeurs numériques dans l'équation II.7 (N_b), que pour un I et un f non modifiés, le N_b sera plus bas. Il est indiqué dans II.3.6.5.1 , que le rendement standardisé d'azote (N_s) doit être utilisé, lorsque les différences avec N_b sont significatives. Dans le cas d'un épuisement des éléments nutritifs, on assistera également à un déplacement vers le nord de la limite de séparation entre les régions dont l'eau constitue le facteur de croissance le plus limitatif, et celles où ce sont les éléments nutritifs qui sont le plus limitatifs (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 369). La région pour laquelle il faut utiliser l'équation II.15 (B), au lieu de l'équation II.7 (N_b), pour les estimations de la production, sera encore plus sèche (II.3.4). De telles modifications ne peuvent être constatées qu'à condition de suivre l'évolution des pâturages dans le temps (fin de II.4.5.2).

En utilisant ce manuel dans les programmes de développement des régions, pour l'exploitation et la gestion des territoires des villages ou des ranchs, il faut entre autre vérifier les estimations de la capacité de charge (II.4.5.2). Cette vérification est déjà rendue nécessaire par le simple fait que la fraction estimée de N_b qui est perdue à cause de la pâture ($f_{é}$, III.2.2.2) et sur la base de laquelle la production des pâturages est déterminée, ne sera souvent pas égale à la valeur réelle de $f_{é}$ qui correspond à la capacité de charge déduite de la production. Le $f_{é}$ utilisé lors du calcul de N_b, (et donc pour l'estimation de la production), est en effet basé sur les statistiques du cheptel ou sur des comptages individuels destinés à l'évaluation et sur la production moyenne escomptée. Dans l'exemple exposé dans II.5.6 (ranch de Niono), la valeur $f_{é}$ utilisée pour l'estimation de la production des pâturages est égale à 0,04, et ce, compte tenu de la faible charge de bétail et de la meilleure protection contre les feux. La capacité de charge estimée, compte tenu des seules pertes de biomasse (III.4.2) et des normes de production animale (III.4.3), entraînerait une valeur de $f_{é}$ d'environ 0,1. Ce n'est que lorsque le risque de compactage superficiel susmentionné entraîne la décision qu'il est préférable de ne pas utiliser une unité telle que F41, que l'estimation de la capacité de charge entraîne un $f_{é}$ égal à celui utilisé pour le calcul de la production. Quoique le mauvais état des pâturages en dehors du ranch semble confirmer fortement la véracité d'une telle estimation en matière de durabilité, la possibilité d'utiliser une norme d'environnement aussi stricte est nulle :
- le besoin actuel est tellement grand que l'exigence de durabilité peut difficilement être appliquée ;
- du point de vue de la technique de production, une pâture extrêmement intensive est considérée comme une manière de profiter des espèces pérennes, qui pourraient être présentes sur l'unité (Boudet & Leclercq, 1970).

S'il est décidé d'occuper les pâturages conformément à l'estimation de la capacité de charge, sans tenir compte du risque de compactage superficiel, ce sera $f_{é}$ 0,1 qui sera retenu. Lorsque l'accroissement de $f_{é}$ dû à une occupation 2,5 fois plus importante ne peut être compensé par la réduction des autres pertes d'azote (III.4.2), le total de f augmentera également. Cet accroissement ne sera pas 0,1 - 0,04 = 0,06, mais moins, car une ingestion plus élevée de fourrage entraîne des pertes moins importantes par volatilisation, feux, etc. (III.2.2.2). Le total plus élevé de f entraînera à la longue un N_b plus faible, et donc une plus faible production des pâturages. Cela ne signifie pas nécessairement une production animale moindre (voir les considérations concernant le bilan d'azote dans l'ouvrage de Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 275-283 et 458-462). Pour que cela se réalise, il faut cependant que le pâturage reste intact ; le sol ne doit pas se dégrader (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 372). Si le seul effet produit est la diminution de la disponibilité en éléments nutritifs, le fé plus élevé entraînera à la longue une valeur de N_s plus faible, donc une production plus faible de biomasse et/ou un taux d'azote plus bas.

La fraction disponible et/ou utilisable diminue donc au cours du temps. Cet effet pourra être constaté lorsque l'état des pâturages est observé dans le temps. Compte tenu des différences de rapidité dans les processus, l'apparition de zones dénudées et la disparition des espèces pérennes seront constatées dans la plupart des cas avant l'épuisement du sol. Ce sont les normes écologiques qui seront transgressées en premier.

III.4.4.3. Composition de la végétation

Les normes relatives à l'environnement ne concernent pas seulement la disponibilité en eau et en azote, la composition des pâturages doit également être prise en compte.

Diverses modifications entraînant des conséquences négatives peuvent intervenir :
- Modification de la dominance ou présence d'espèces qui ne découlent pas directement de la pâture, mais indirectement, par suite de compactage superficiel et de l'inégal disponibilité en eau qui en résulte (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 364-365).
- Disparition des espèces pérennes et modification de la composition floristique en faveur d'espèces à cycle de plus en plus court, modification floristique due directement à une pâture trop intense (ce phénomène ressemble au premier et est souvent confondu avec lui). Ce genre d'évolution n'est pas lié à un substrat déterminé comme dans le premier cas (plus la sensibilité au compactage superficiel est grande, plus les modifications seront rapides), mais est lié à des endroits précis, telle la proximité de puits, de corrals et de villages, où la charge de bétail est la plus élevée.
- Si la charge de bétail n'augmente que progressivement (un concept relatif dont la valeur absolue dépend de la sensibilité du substrat face à l'érosion et face au climat), cette modification directe peut aller de pair avec une troisième modification : tendance vers une dominance croissante d'espèces non appétées ou peu ou pas consommées.

D'une manière générale, la superficie sur laquelle les deux dernières évolutions se manifestent est relativement limitée, mais cela ne signifie pas que ces modifications sont de peu d'importance. En effet, elles entraînent non seulement une diminution de la disponibilité fourragère, mais l'accroissement de

l'hétérogénéité en matière de disponibilité en phosphore équivaut de plus en plus à la perte de phosphore. Il en résulte finalement, une protection toujours moins efficace du sol par une végétation toujours plus clairsemée, composée d'espèces à cycles toujours plus courts, un sol toujours plus mobile, ou bien une évolution de la composition floristique vers des espèces non appétibles.

Les suites indirectes ne seront pas traitées ici de façon détaillée ; elles ne peuvent être évitées qu'à condition de veiller à ce que la disponibilité en eau ne diminue pas à cause de l'exploitation (III.4.4.1). Par contre, les suggestions faites dans II.5.6.4 seront développées. Elles visent à exploiter durablement les populations d'espèces ligneuses et de graminées pérennes, à combattre l'érosion éolienne ou à éviter l'augmentation d'espèces non appétées.

La sensibilité des arbres, des arbustes et des graminées pérennes vis à vis de l'exploitation, est vraisemblablement liée aux perturbations du processus qui intervient fortement dans leur position concurrentielle : formation d'une réserve d'éléments nutritifs et d'assimilats. Cette réserve entraîne une biomasse beaucoup plus importante que pour les espèces annuelles dans des conditions analogues. Lorsque la biomasse totale est traitée en tant que production exploitable, la formation de réserves ne peut s'effectuer et les réserves déjà présentes sont entamées. Malgré cette concordance entre les deux groupes d'espèces, une norme d'exploitation différente est suggérée pour les espèces ligneuses et les graminées pérennes :
- La recirculation interne d'azote et de phosphore pourrait s'avérer plus élevée pour les espèces ligneuses que pour les graminées pérennes. Ce manuel utilise une moyenne de 60 % pour les espèces ligneuses, compte tenu des valeurs observées pour les arbres sur les sols pauvres à d'autres endroits (III.2.5.1). Pour *Andropogon gayanus*, il existe des indications selon lesquelles la valeur de l'azote se situerait entre 25 et 50 % (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 286-291). Des indications en provenance de la zone soudanaise semblent prouver que 50 % est une valeur réaliste (den Held, 1983).
- L'intensité de pâture sur les graminées pérennes est généralement plus élevée et moins saisonnière.

Espèces ligneuses

La disponibilité du fourrage des espèces ligneuses pendant la saison sèche représente au maximum 15 % environ de la production annuelle lorsque le bétail doit se la procurer lui-même (voir II.2.3). La question qui se pose est de savoir si du point de vue de la durabilité, il est souhaitable de permettre une intensification de l'exploitation. Par exemple en augmentant le nombre de chèvres, jusqu'à ce que tout le pâturage aérien accessible soit consommé au cours de l'année, ou bien en coupant pendant la saison sèche toutes les branches portant des feuilles. Ainsi, au maximum 30 ou 40 % respectivement de la production annuelle pourrait être utilisée, dont 20 et 30 % de feuilles plus tiges. Une synthèse des résultats obtenus à la suite de nombreuses expériences effectuées le plus souvent sur une courte durée, fait apparaître que les espèces qui peuvent survivre pendant plusieurs années à une telle intensité d'exploitation sont nombreuses. La plupart du temps, une mortalité rapide n'intervient que lors d'une exploitation annuelle de plus de la moitié de la production annuelle de feuilles, ou lors d'une défoliation fréquente au début de la saison de croissance. Cela ne signifie pas que la moitié du fourrage des espèces ligneuses puisse être utilisée sans entraîner d'effets négatifs : il existe des indications selon lesquelles

même dans le cas d'une intensité d'exploitation moindre, il y a diminution de la production ou perte de qualité.

Bien qu'il existe de grandes différences dans les réactions des différentes espèces vis à vis de la défoliation, il semble quand même que d'une manière générale, les effets de l'exploitation peuvent être le mieux compris à partir des répercussions sur les réserves d'assimilats et d'éléments nutritifs. Là où dans la région les espèces ligneuses sont importantes, ce sont les éléments nutritifs qui déterminent la production. C'est pourquoi il est préférable d'établir la définition d'un niveau d'exploitation durable sur la base de la disponibilité en éléments nutritifs. Il importe de savoir si ce niveau est plus élevé pour les espèces ligneuses que pour la strate herbacée annuelle, sur laquelle se base ce manuel. Ceci pourrait être le cas s'il y avait un approvisionnement en phosphore à partir des couches profondes du sol. Cet apport semble cependant très limité. Pour l'instant la disponibilité annuelle en azote pour la végétation des pâturages, fortement déterminée par la disponibilité en phosphore (efficacité de la fixation symbiotique de l'azote), est supposée ne pas être influencée notablement par la présence d'espèces ligneuses (Kessler & Breman, 1990). Dans cette hypothèse, l'exploitation du pâturage aérien ne pourrait dépasser 15 % de la production annuelle, sinon les pertes d'azote du pâturage dans son ensemble seraient supérieures à l'apport d'azote. Les espèces ligneuses seraient alors contraintes d'utiliser leurs réserves et d'affaiblir leur position concurrentielle.

A cause de la préférence marquée du bétail, la pression sur les espèces les plus appétées s'avère vite trop lourde. Et ce, même lorsque la densité de bétail a été choisie de manière à ne pas dépasser une exploitation de plus de 15 % de la production totale de pâturage aérien.

Graminées pérennes

Les graminées pérennes qui ne sont pas ou peu exploitées, forment dans la région des touffes riche en biomasse mais de très faible valeur nutritive. De ce point de vue, la suggestion de Boudet et Leclercq (1970) visant à exploiter intensivement pendant la saison des pluies les unités avec beaucoup d'*Andropogon gayanus*, est compréhensible. Entre temps, l'évidence de la grande sensibilité des graminées pérennes vis à vis de la sécheresse et du pâturage a été constatée (Breman & Cissé, 1977 ; Cissé & Breman, 1980 ; I.1). Par ailleurs, ces espèces sont installées dans des unités importantes sur des sols ayant une grande sensibilité à l'encroûtement (III.4.4.1). De plus, les graminées pérennes seront plus utiles pour prolonger la « saison verte », permettant la croissance du bétail (Breman & Traoré, 1987), et également pour limiter la perte de poids pendant la saison sèche au moyen de la repousse.

Tout ces arguments plaident en faveur d'une utilisation limitée et soigneuse des espèces pérennes, surtout pendant la saison de croissance, au moment où les réserves sont mobilisées pour le développement de la biomasse aérienne (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 286). Plus la saison de croissance est courte et plus la position des espèces pérennes est instable (I.1.4). Il semble donc opportun de ne pas exposer les espèces pérennes à une intensité d'exploitation supérieure à celle des espèces annuelles. Ceci entraîne les suggestions qui suivent.

Du point de vue de la dynamique des réserves, le calcul de la disponibilité (= estimation des pertes et de la valeur utilitaire) ne doit pas être basé sur plus de la moitié de la production pendant la saison des pluies. La réduction de 50 % n'est pas appliquée pour la production pendant la saison sèche, parce que la croissance pendant la saison sèche ne représente qu'une fraction de la croissance pendant la période des pluies. Pendant cette saison sèche, les éléments nutritifs peuvent ne pas provenir exclusivement des réserves, mais émaner partiellement des couches relativement profondes du sol (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 288-291). Par contre, la différence entre l'ingestion apparente et réelle de fourrage est prise en compte : tout comme pour la pâture pendant la saison des pluies, les pertes de fourrage dues au pâturage sont estimées à 50 %, à moins que des données spécifiques pour l'endroit en question divergent à cet égard. Pour les plaines d'inondation du Niger, se référer à Hiernaux (1980a).

Il découle de cette procédure que la charge de bétail augmente parallèlement à la croissance des espèces pérennes pendant la saison sèche. La croissance pendant la saison sèche semble globalement s'accroître proportionnellement à la croissance principale. Il ressort de la figure III.35 que les espèces pérennes peuvent surtout jouer un rôle important là où elles courent le moins de risques : dans la savane guinéenne et dans les endroits profonds des plaines d'inondation. La figure indique une augmentation de la production liée à la longueur de la saison des pluies ou à la durée des inondations. Dans les deux cas, il est question d'une proportionnalité entre la croissance pendant la saison des pluies et la croissance pendant la saison sèche, mais dans le cas d'une production pluviale, le facteur de proportionnalité est beaucoup plus petit que dans le cas d'inondations. Dans ce dernier cas, ce sont les parties les plus basses qui seront les plus fertiles.

Pour les régions où les espèces pérennes présentent le moins de force concurrentielle (savane du nord et Sahel) et où elles se situent sur des sols sensibles à l'érosion et à l'encroûtement, on suggère de les exploiter uniquement pendant la saison sèche, tant que des raisons économiques empêchent l'apport d'engrais. En première instance, cela signifie sélection de feuilles encore vertes et d'inflorescences, ensuite sélection de la repousse (éventuellement après les feux), au moment où les réserves dans les systèmes des racines se sont reconstitués.

Dans le cas d'absence de données concernant la production des espèces pérennes pendant la saison sèche, les rapports de la figure III.35 peuvent être utilisés à des fins d'estimation (II.2.2.4 et 5 ; II.3.6.6).

Figure III.35
Rapport entre la production aérienne des graminées pérennes pendant la saison des pluies (croissance principale) et pendant la saison sèche (croissance secondaire, ou repousse après fauche ou feux), dans la zone de la savane ([rond noir]) et dans la plaine d'inondation (delta central du Niger; ×).

Diminution de la durée du cycle

Un degré d'érosion éolienne qui empêche la germination et l'installation au début de la saison des pluies, n'intervient pas lorsque la capacité de charge basée sur les normes de production animales est respectée. Une production de matière sèche de quelques centaines de kg/ha pendant la saison des pluies, dont

quelques dizaines de kg/ha subsistent à la fin de la saison sèche, suffit pour prévenir la mobilité « définitive » du sable (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 360). Mais même lorsque cette capacité de charge est prise en considération pour l'ensemble d'une zone de pâturages, la charge réelle autour des points d'abreuvement et des villages peut aisément être dépassée. Ce phénomène ne doit pas entraîner la disparition de la végétation ni la rendre inutilisable (voir ci-après), car dans ce cas, l'enrichissement de ces endroits en éléments nutritifs signifierait perte d'éléments nutritifs.

Lorsque l'intensité de la pâture est forte et continue, les espèces à germination rapide et à long cycle de croissance disparaissent pour être remplacées par des espèces à germination hétérogène ou lente et cycle de croissance court (Breman *et al.* , 1980). En soi, cela ne constitue pas un problème, d'autant plus que la disponibilité en éléments nutritifs est relativement élevée. Ce n'est donc pas une raison pour que la production de la biomasse baisse, du moins tant qu'il n'y a pas de compactage superficiel du sol.

Ces espèces produisent souvent un nombre de graines relativement élevé, à condition que leur croissance ne soit pas perturbée (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 119-121 ; Djitèye, 1981 ; Cissé, 1986). Mais la possibilité de production est limitée, à moins qu'il y ait évolution vers des espèces moins appétibles (voir ci-après). Il peut se produire ainsi une situation où la charge de bétail pendant la germination et l'installation est tellement importante par rapport à la réserve de graines, que la végétation n'a pas la possibilité de s'installer pendant la période de pluies.

A partir de la production moyenne des pâturages, il est possible d'indiquer quelle est l'occupation maximum des pâturages pour empêcher qu'une évolution de la végétation vers des espèces à cycle de plus en plus court ne débouche sur une dégradation totale et une mobilité du sable. Dans le cas d'une pluviosité de 150, 200, 300 et 400 mm/an, la production moyenne est de 495, 855, 1465 et 2155 kg/ha, à condition qu'il y ait infiltration totale de la pluie (substrat sablonneux ; équations II.15 et II.7). La production des graines représente environ 10 % de la production totale de la biomasse (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 120). Avant qu'il ne soit question d'une germination visible, les pertes en graines représenteront 80 % de la production annuelle (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 122-124). Pour une pluviosité moyenne de 150, 200, 300 et 400 mm/an, il faut donc s'attendre à 10, 17, 29 et 43 kg/ha en moyenne de graines germinatives. La saison de croissance proprement dite est précédée d'une période de pluies restreintes et irrégulières, d'une durée de 40 jours environ. Une période de la moitié de ces jours ou encore moins, permet la croissance de plantules dans le cas de 150 mm ; dans le cas d'une pluviosité de 400 mm cette période est de 25 jours. Supposons deux vagues de germination au cours de cette période, dont chacune concerne la moitié des graines. La production de la biomasse sur la totalité de la période de 40 jours, pourra alors s'élever à 60, 110, 220 et 380 kg/ha pour une vitesse de croissance relative de 0,175 kg/kg par jour jusqu'au moment où la croissance atteindra son maximum (35 kg/ha par jour ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 112).

Le besoin en fourrage sur 40 jours est estimé à 230 kg/UBT, l'occupation pour 150, 200, 300 et 400 mm ne doit dès lors pas atteindre un niveau qui entraînerait une disponibilité inférieure à 4, 2, 1 ou 0,6 ha/UBT vers le début de la saison des pluies. Sinon le risque de formation de sable vif autour du puits ou du village est important. En l'absence d'attention particulière, des problèmes peuvent se présenter aux

alentours d'un puits de débit moyen de 12 m³/jour (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 418) lorsque la pluviosité moyenne est de 200 mm/an ou moins. Un tel puits fournit suffisamment d'eau pour abreuver environ 500 UBT. Dans le cas d'une exploitation sédentaire, le bétail séjournera certainement la moitié du temps à proximité du puits. Dans l'hypothèse où le bétail s'éloignerait au maximum de 500 m au cours de cette période, seul 0,15 ha serait disponible par UBT. Si cependant le reste de la journée, les animaux paissent activement sur des pâturages non surexploités, la plus grande partie du temps passé aux alentours du puits sera consacrée à la rumination ou au repos. Supposons que 10 % du besoin journalier en fourrage est recherché aux environs du puits, la disponibilité effective serait alors de 1,5 ha/ UBT. Les problèmes apparaîtront pour 300 et 400 mm, lorsque le village dispose de deux et trois puits à débit moyen.

Dans le sud du Sahel, le risque d'une dégradation totale de la végétation sur sable et la formation consécutive de sable vif par suite de la pâture, est limité. Dans le cas d'une pluviosité moyenne de 400 mm/an, il faudrait pour cela (compte tenu des chiffres de production cités ci-dessus), des densités de bétail de 2500 UBT par village, ou bien 5 puits à débit moyen. La situation se modifie cependant lorsque l'agriculture a épuisé le sol à un point tel que la production moyenne de pâturage ne peut être réalisée sur les jachères, comme dans de grandes parties du sud du Niger par exemple.

Diminution de la appétibilité

En l'absence de sable vif ou de compactage superficiel autour d'un puits ou d'un village, il y a risque d'évolution dans la composition floristique vers des espèces moins appétibles. Lorsque la charge de bétail est continuellement élevée, ces risques augmentent au fur et à mesure de l'accroissement de la pluviosité et du décroissement de sa variabilité. Sur les substrats sablonneux, de telles évolutions peuvent se produire pour une pluviosité moyenne de 200 à 300 mm/an ou plus. Sur les sols sensibles à l'encroûtement, ce processus ne prendra le pas sur le compactage superficiel et le ruissellement accru, que loin dans la savane.

L'évolution décrite ci-dessus concernant l'apparition d'espèces à cycle plus court, peut déjà aller de pair avec une diminution de l'appétibilité pendant la fructification et le mûrissement. Ceci est par exemple le cas lorsque *Schoenefeldia gracilis* est remplacé par *Cenchrus biflorus* et que *Zornia glochidiata* est remplacé par *Tribulis terrestris*. Les graines de *Acanthospermum hispidum* , déjà peu consommées, sont de plus épineuses. Lorsqu'une évolution intervient en faveur d'espèces déjà difficilement appétibles pendant la phase végétative, il y a une possibilité d'inversion de l'évolution en faveur d'espèces à cycle plus court. Des espèces peu ou pas consommées telles que *Cassia tora* , *Cassia occidentalis* , *Sida alba*, etc., présentent un cycle long.

Les espèces qui domineront dans les alentours des villages ou des puits, sur des terres enrichies par le fumier, sont appelées parfois nitrophiles, bien que l'on puisse aussi bien parler de phosphofiles (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 365). De telles appellations suggèrent que la composition floristique doit se modifier dans le cas d'apport d'engrais. C'est inexact : les espèces qui dominent normalement les pâturages naturels peuvent réagir à l'apport d'engrais et augmenter leur production. Cela vaut par

exemple pour *Diheteropogon hagerupii, Schoenefeldia gracilis* et *Cenchrus biflorus*.

Un cas particulier d'évolution vers des végétations dominées par des espèces peu appétibles, est l'embroussaillement. Ce processus intervient en principe dans le cas de surpâturage, dans les mêmes circonstances qu'indiquées pour la modification de la strate herbacée. Il se produit pendant la phase où les longueurs de cycle des espèces composant la végétation se raccourcissent de plus en plus, et quand l'occupation atteint un tel degré d'intensité que même ces espèces ont à peine une possibilité de croissance. Les espèces ligneuses présentes disposent alors d'une quantité supplémentaire d'eau (non utilisée par la strate herbacée) et d'éléments nutritifs (apportés par le bétail). Les espèces ligneuses qui ont ainsi une possibilité de dominance, ne peuvent y parvenir qu'à condition d'avoir un goût ou des épines qui les protègent de la consommation. Par ailleurs, il faut que la demande en bois de la population soit inférieure à la production annuelle stimulée. Cette demande étant surtout couverte par des arbres assez grands, la stimulation se concrétise par la formation d'arbustes de plus en plus denses. Ce processus constitue un argument supplémentaire en faveur de la théorie selon laquelle la préférence du bétail est plus absolue pour les espèces ligneuses que pour les herbacées.

Les modifications mentionnées signifient que l'occupation extrême des pâturages par des concentrations locales de bétail ne doit pas seulement être évitée là où les sables vifs et le compactage superficiel constituent des risques pour l'environnement, mais également plus au sud, où ces risques sont moindres.

III.4.5. Considérations finales

Il peut paraître étonnant que les critères de l'environnement aient été traités en dernier lieu dans un chapitre dont le titre semble justement se référer directement à ces critères. L'ordre des trois groupes de critères traités a été choisi consciemment par rapport aux objectifs des estimations de capacité de charge et de leurs possibilités de réalisation. Les objectifs sont :
- obtention de connaissances sur les pâturages et donc élargissement de la compréhension de l'élevage, de ses possibilités et de ses limites ;
- conseils et services aux éleveurs afin de leur permettre d'atteindre une utilisation optimale des pâturages, et conseils d'amélioration des pâturages sur la base d'identification des facteurs qui déterminent leur capacité de charge ;
- contrôle de l'utilisation des pâturages dans la pratique.

Dans la réalité d'aujourd'hui, ce dernier objectif reste dans la plupart des cas une chimère. La loi et les réglementations actuelles concordent rarement avec les droits fonciers traditionnels (Breman & Traoré, 1986a, b ; 1987), alors que leur portée pour les deux auprès de la population locale reste très limitée. Par ailleurs, les services gouvernementaux ne possèdent ni la connaissance, ni les moyens pour imposer le respect de ces règles, alors que les services qui seraient le plus habilités (Services d'Elevage ; Eaux et Forêts) mettraient leur crédibilité en jeu et ne pourraient plus remplir leurs autres tâches s'ils assuraient cette fonction. Ce n'est que lorsque le contrôle de l'utilisation des pâturages sera réglementé en tenant compte de l'importance des avis des utilisateurs, que la réalisation de l'ultime objectif des estimations de capacité de charge sera en vue (Breman & Traoré, 1986a, b ; 1987). Il ne faudrait cependant pas que

cette responsabilité soit limitée exclusivement au plan local. En effet, une bonne gestion de l'environnement concerne les régions ainsi que la nation, et l'élevage transhumant constitue une plus-value importante.

Tant que cet idéal est encore loin, les normes de l'environnement n'interviendront en rien dans la détermination de la capacité de charge. La question se pose même de savoir s'il est justifié d'appliquer ces critères dans des situations où leur instauration ne permettrait pas un élevage viable, sans en contrepartie proposer d'alternative pour l'élevage. Il existe au moins deux situations dans lesquelles le dépassement de la capacité de charge n'entraîne pas à court terme une diminution de la production et la perte de la viabilité de l'élevage, mais au contraire une augmentation importante de la production : l'exploitation maximale des pâturages par un système transhumant, et le surpâturage sur des sols très pauvres à infiltration homogène de l'eau.

C'est dans cette optique qu'a été développée la méthodique de l'estimation de la capacité de charge (II.5), les conditions extérieures étant précisées au fur et à mesure. Une production vraiment durable ne peut être réalisée qu'en tenant compte de l'ensemble de ces conditions. La seule prise en considération des pertes et des normes de production animale, met en cause à long terme la viabilité des systèmes d'élevage. Mais lorsque la production de lait et de viande constitue l'objectif principal et que les normes en la matière sont respectées, cette mise en cause ne risque heureusement pas de se produire à court terme dans la plupart des cas d'environnement. Les systèmes et les situations où les risques pour l'environnement sont les plus grands sont mentionnés à la fin de II.5 .

Compte tenu de l'importance des graminées pérennes du point de vue de la production animale et de la stabilité du milieu, les espèces ligneuses assurant en outre d'autres fonctions, le manuel n'est à cet égard, pas conforme à la logique : on suggère de tenir compte, déjà au moment de la détermination de la disponibilité fourragère, du danger de la surexploitation des deux groupes d'espèces, et donc d'y inclure les exigences de l'environnement.

Partie IV, bibliographie et annexes

Manuel sur les pâturages des pays sahéliens (Partie IV, Bibliographie et Annexes)

REALISATION

Rédaction : H. Breman & N. de Ridder

Table des matières
Partie I
Partie II.1 et II.2
Partie II.3
Partie II.4 et II.5
Partie III

Partie IV

IV. Renseignements supplémentaires

IV.1. Objectifs

Cette partie propose une récapitulation des données concernant les espèces végétales (IV.2), un glossaire (IV.3) et une liste des symboles et abréviations utilisés (IV.4). Un dépliant avec les équations et une carte de pâturages figurent séparément en annexe.

L'ensemble des données relatives aux espèces joue un rôle capital pour l'évaluation : l'interprétation et la standardisation (II.3.6.2-5) des données d'une année quelconque, concernant la production et le rendement d'azote, s'effectuent en partie sur la base des propriétés des espèces présentes. Les propriétés qui importent dans cette optique sont notamment les propriétés physiologiques et morphologiques (IV.2.1). L'habitat, la distribution (IV.2.2) et les aspects qualitatifs (IV.2.3) importent pour l'estimation de la valeur d'une espèce en tant que plante de pâturage. Tel qu'il ressort du dernier paragraphe mentionné, le taux d'éléments nutritifs des espèces herbacées varie fortement : on a souligné à plusieurs reprises que la disponibilité relative en eau et en éléments nutritifs importent plus à cet égard que les propriétés propres à l'espèce.

La digestibilité du fourrage des espèces herbacées et les aspects qualitatifs des espèces ligneuses en général, sont cependant fortement liées à l'espèce. Les propriétés qualitatives de ce dernier groupe sont

présentées dans IV.2.4.

Le chapitre IV.2 a également été conçu pour apporter une aide sérieuse à l'exploitation, à la gestion et à l'aménagement des pâturages (II.4.5) ; on constate qu'il subsiste de grandes inconnues pour bien des espèces. Il est donc possible que d'autres publications soient plus explicites. Il n'est pas non plus exclu que le nombre limité d'observations pertinentes ait entraîné une caractérisation erronée des espèces.

Le chapitre IV.2 s'adresse principalement aux utilisateurs du manuel au sens strict (partie II). Ceci vaut également pour le dépliant avec les équations nécessaires à l'évaluation.

Pour la plupart des utilisateurs, la carte ne constituera qu'une illustration de II.3. Pour les utilisateurs maliens, ou pour tous ceux qui ont la possibilité de se rendre sur le trajet, la carte représente une base pour l'étude des modifications de l'état des pâturages (Breman & Diarra, 1991). Les conditions climatiques et l'intervention humaine, influencée ou non par la politique nationale en matière d'utilisation des terres et de développement rural, entraînent-elles une amélioration ou une dégradation de la situation ? Ce qui importe pour répondre à cette question, ce sont les données quantitatives relatives à la production et à la qualité tant de la strate herbacée que des espèces ligneuses. Il s'agit des données avant (tableau II.23) et après la sécheresse du début des années 70 (tableaux II.21 et II.22), des données relatives au recouvrement par les espèces ligneuses (voir légende de la carte) et des données concernant les surfaces dégradées des pâturages et des cultures (dos de la carte).

Le glossaire et les listes des symboles et abréviations sont destinés de façon générale à tous les lecteurs.

IV.2. Donnes concernant les plantes de pâturages

IV.2.1. Propriétés des espèces herbacées

Le manuel effectue une répartition grossière en fonction du mode de vie, que l'on retrouve ici comme critère de classement des espèces dans les tableaux de ce chapitre : herbacées/ligneux ; annuelles/ pérennes ; graminées/légumineuses/diverses. Seuls les tableaux IV.I et IV.14 indiquent par espèce la famille à laquelle elles appartiennent. C'est le seul endroit où le nom de l'auteur est mentionné. Les noms auxquels il est fait référence sont ceux de Berhaut (1967) pour la strate herbacée ; Geerling (1982) a été choisi pour les espèces ligneuses. Lorsque aucun des deux ne s'est prononcé sur l'espèce, on s'est référé aux publications de Boudet, relatives aux végétations du Mali. L'habitude de Berhaut (1967), d'écrire le nom de certaines espèces avec deux majuscules, n'a pas été suivie.

Tableau IV.1
Liste des espèces herbacées avec indication de la famille à laquelle elles appartiennent et de leur mécanisme de photosynthèse[1)].

nom	auteur	famille	mécanisme de photosynthèse[1])
graminées annuelles :		*Gramineae*	
Andropogon pseudapricus	Stapf.		C_4
Aristida adscensionis	L.		C_4
Aristida funiculata	Trin. et Rupr.		C_4
Aristida mutabilis	Trin.		C4
Brachiaria deflexa	(Sch.) Hubb.		C_4
Brachiaria distichophylla	Stapf.		C_4
Brachiaria lata	(Schum.) Hubb.		C_4
Brachiaria xantholeuca	Stapf.		C_4
Cenchrus biflorus	Roxb.		C_4
Cenchrus prieurii	Maire.		C_4
Chloris pilosa	Sch. et Thonn.		C_4
Chloris prieurii	Kunth.		C_4
Ctenium elegans	Kunth.		C_4
Dactyloctenium aegyptium	Beauv.		C_4
Digitaria ciliaris	(Retz.) Koel.		C_4
Digitaria gayana	Stapf.		C_4
Digitaria longiflora	Pers.		C_4
Diheteropogon hagerupii	Hitch.		C_4
Echinochloa colona	Link.		C_4
Elionurus elegans	Kunth.		C_4
Eragrostis lingulata	W.D. Clayton		C_4 ?
Eragrostis pilosa	P. Beauv.		C_4
Eragrostis tremula	Hochst.		C_4
Loudetia togoensis	Hubb.		C_4

Microchloa indica	(L.) Beauv.		C_4
Oryza barthii	A. Chev.		C_3 ?
Panicum laetum	Kunth.		C_4
Pennisetum pedicellatum	Trin.		C_4
Rottboullia exaltata	L.		C_4
Schizachyrium exile	Stapf.		C_4
Schoenefeldia gracilis	Kunth.		C_4
Setaria barbata	Kunth.		C_4
Setaria pallidifusca	Stapf. et Hubb.		C_4
Tetrapogon cenchriformis	(A. Rich.) Clayton		C_4
Tragus berteronianus	Schult.		C_4
Tragus racernosus	(L.) Allioni		
graminées pérennes :		*Gramineae*	
Andropogon ascinodis	C.B. Cl.		C_4 ?
Andropogon canaliculatis	Schum.		C_4 ?
Andropogon gayanus	Kunth.		C_4
Brachiaria mutica	Stapf.		C_4
Cymbopogon schoenanthus	Spreng.		C_4 ?
Cynodon dactylon	Pers.		C_4
Echinochloa pyramidalis	Hitch. et Ch.		C_4
Echinochloa stagnina	P. Beauv.		C_4
Eragrostis barteri	C.E. Hubbard		C_4 ?
Hyparrhenia dissoluta	Hubb.		C_4 ?
Hyparrhenia rufa	Stapf.		C_4
Leptothrium senegalense	(Kunth.) W.D. Clayton		
Oryza longistaminata	Chev. et Roehr.		C_3 ?
Panicum anabaptistum	Steud.		C_4 ?

Paspalum orbiculare	Forst.		C_4 ?
Setaria sphacelata	(Sch.) Stapf & C.E. Hubbard ex M.B. Moss		
Sorghum trichopus	Stapf.		
Sporobolus festivus[2)]	Hochst.		C_4
Sporobolus helvolus	Dur. et Sch.		C_4
Sporobolus ioclados	Nees		C_4
Tripogon minimus[2)]	Hochst.		C_4
Vetiveria nigritana	Stapf.		
Vossia cuspidata	Griff.		
légumineuses annuelles :			
Aeschynomene indica	L.	*Papilionaceae*	
Alysicarpus ovalifolius	(S. et Th.)	*Papilionaceae*	C_3
Cassia mimosoides	L.	*Caesalpiniaceae*	C_3
Cassia tora[3)]	L.	*Caesalpiniaceae*	C_3
Indigofera astragalina	DC.	*Papilionaceae*	C_3
Indigofera pilosa	Poir.	*Papilionaceae*	C_3 ?
Indigofera prieuriana	G. et Perr.	*Papilionaceae*	C_3
Zornia glochidiata	Reichb.	*Papilionaceae*	C_3
légumineuses pérennes :			
Tephrosia uniflora	Pers.	*Papilionaceae*	C_3
autres4) :			
Acanthospermum hispidum	DC.	*Compositeae*	C_3
Achyranthes argentea	Lam.	*Amaranthaceae*	C_3 ?
Blepharis linariifolia	Pers.	*Acanthaceae*	C_4
Blepharis maderaspatensis	(L.) Heyne	*Acanthaceae*	
Boerhaavia repens	L.		C_4 ?
Borreria chaetocephala	(DC.) Hepp.	*Rubiaceae*	C_3
Borreria filifolia	(S. et Th.) K. Schum.	*Rubiaceae*	C_3 ?

Borreria radiata	DC.	*Rubiaceae*	C_3
Borreria scabra	(S. et Th.) K. Schum.	*Rubiaceae*	C_3 ?
Borreria stachydea	(DC.) H. et Dalz.	*Rubiaceae*	C_3
Ceratotheca sesamoides	Endl.	*Pedaliaceae*	C_4 ?
Cienfuegosia digitata	Cav.	*Malvaceae*	
Citrullus vulgaris	Schrad.	*Cucurbitaceae*	
Cleome monophylla	L.	*Capparidaceae*	
Cochlospermum tincturium	A. Rich.	*Cochlospermaceae*	
Commelina forskalaei	Vahl.	*Commelinaceae*	C_3 ?
Corchorus tridens	L.	*Tiliaceae*	C_3 ?
Cyperus compressus	L.	*Cyperaceae*	C_4
Cyperus maculatus	Böck.	*Cyperaceae*	C_4 ?
Cyperus reduncus	Hochst.	*Cyperaceae*	
Euphorbia aegyptiaca	Boiss.	*Euphorbiaceae*	
Evolvulus alsinoides	L.	*Convolvulaceae*	C_4 ?
Fimbristylis hispidula	(Vahl) Kunth	*Cyperaceae*	C_4 ?
Gisekia pharnacioides	L.	*Aizoaceae*	C_4
Gynandropsis gynandra	(L.) Briq.	*Capparidaceae*	C_4
Gynandropsis pentaphylla	DC.	*Capparidaceae*	C_4
Heliotropium strigosum	Willd.	*Boraginaceae*	C_4
Hibiscus asper	Hook.	*Malvaceae*	
Hyptis suaveolens	Poit.	*Labiatae* ?	
Ipomaea aquatica	Forsk.	*Convolvulaceae*	C_3 ?
Ipomaea coscinosperma	Hochst.	*Convolvulaceae*	C_3 ?
Ipomaea vagans	Bak.	*Convolvulaceae*	C_3 ?
Ipomaea verticellata	Forsk.	*Convolvulaceae*	C_3 ?
Kohautia senegalensis	Cham. et Schl.	*Rubiaceae*	
Kyllinga triceps	Rottb.	*Cyperaceae* ?	C_4
Lepidagathis anobrya	Nees.	*Acanthaceae*	

Limeum pterocarpum	(Gay) Heimerl.	*Aizoaceae*	C_4 ?
Merremia pinnata	(L.) Urba.	*Convolvulaceae*	
Mitracarpus scaber	Zucc.	*Rubiaceae*	
Mollugo nudicaulis	Lam.	*Aizoaceae*	C_4
Monechma ciliatum	(Jacq.) Miln.-Red.	*Acanthaceae*	C_3 ?
Pandiaka heudelotii	(Moq.) Hook	*Amaranthaceae*	C_3 ?
Peristrophe bicalyculata	(Retz.) Nees.	*Acanthaceae*	
Phyllanthus niruri	L.	*Euphorbiaceae*	
Polycarpaea corymbosa	(L.) Lam.	*Caryophyllaceae*	C_4
Polycarpaea eriantha	Hochst.	*Caryophyllaceae*	C_4 ?
Polycarpaea linearifolia	DC.	*Caryophyllaceae*	C_4 ?
Portulaca oleracea	L.	*Portulacaceae*	C_4
Tribulus terrestris	L.	*Zygophyllaceae*	C_4
Triumfetta pentandra	A. Rich.	*Tiliaceae*	

---

[1] C_3 et C_4 : caractérisation de la photosynthèse, voir glossaire (IV.3) ; selon Penning de Vries & Djitèye, (1982 : p. 93) , Raghavendra & Das (1978) et Downton (1975) ;
[2] espèce peu productive, difficilement à distinguer des annuelles ;
[3] sans fixation d'azote ;
[4] espèces annuelles, à l'exception de *Cochlospermum tincturium*.

Le tableau IV.2 réunit les propriétés importantes au début de la saison de croissance, dans la mesure où elles déterminent (notamment en interaction avec le temps et le sol) la place occupée par une espèce à l'intérieur de la végétation d'une année donnée (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 98-112). Il s'agit pour une bonne part de résultats d'observations obtenus dans une chambre climatique (sahélienne), dans des conditions optimales pour la germination et l'installation. Une comparaison pertinente des espèces n'est possible que dans de telles conditions, car l'expression des propriétés est codéterminée par des circonstances extérieures. Ce ne sont pas les valeurs absolues du tableau qui importent, mais les valeurs relatives : les différences entre les espèces s'accentuent dans des conditions suboptimales (sur le terrain), mais il n'y aura pas de modification profonde de l'ordre des espèces lorsqu'elles ont été classées sur la base des valeurs présentées (Elberse & Breman, 1989 et 1990 ; Cissé, 1986).

Sous la rubrique «germination», la vitesse de ce processus a été caractérisée à l'aide de deux valeurs. Si les deux valeurs sont faibles, il s'agit d'une espèce à germination rapide, et l'inverse vaut pour les espèces à germination lente. Si la première plantule apparaît rapidement, alors qu'un laps de temps important s'écoule avant une germination de 50 %, il est question d'une espèces à germination hétérogène.

La résistance à la sécheresse est un concept relatif. Il est difficile d'interpréter les observations sur le terrain, car de petites différences dans la disponibilité en eau - par redistribution de l'eau de pluie à l'échelle micro - sont difficiles à constater. C'est la raison pour laquelle les impressions recueillies sur le terrain sont mentionnées entre parenthèses.

Tableau IV.2
Quelques caractéristiques de germination, d'installation et croissance initiale des espèces herbacées.

	période de germination (jours apres ensemencement)		résistance à la secheresse [2]	vitesse de croissance relative maximum[3)] (g/g par jour)
	première plantule	50% de germination[1)]		
graminées annuelles :				
Andropogon pseudapricus	2,1	2,6		
Aristida adscensionis	1			0,19
Aristida mutabilis	0,5	1,2		0,18 (3)
Cenchrus biflorus	1	1,5	+	0,33
Chloris pilosa	3,0	3,2		
Chloris prieurii	1			
Dactyloctenium aegyptium	2,8	3,0		
Digitaria gayana	3,0	3,4		
Diheteropogon hagerupii	2,0	2,5	++	0,18 (4)
Echinochloa colona	2,0	2,6		0,30
Elionurus elegans	2,0	3,9	-	
Eragrostis tremula	2,8	4,5	+	0,31
Loudetia togoensis	2,3	3,2	+	0,17 (3)
Panicum laetum	2,0	3,4		0,37
Pennisetum pedicellatum	2,8	3,8	-	0,33
Schoenefeldia gracilis	1	1,5	+++	0,28
Tragus berteronianus	3,0	4,0		
graminées pérennes :				
Andropogon gayanus var. gayanus	1,8	2,3		
Andropogon gayanus var. tri.	2,0	2,5		

Leptothrium senegalense	1,9	2,4		
légumineuses annuelles :				
Alysicarpus ovalifolius			-	0,21
Cassia tora	2,0	3,0		0,17 (3)
Indigofera astragalina	2,0	3,2		
Indigofera prieuriana	2,0	2,4		
Zornia glochidiata	1,6	6,2	+	0,22 (4)
autres:				
Blepharis linariifolia	0,1	0,4	++	
Borreria chaetocephala	3,2	4,0	-	0,17
Borreria radiata	1	2,8		0,19
Borreria stachydea	7,0	7,5	--	
Tribulus terrestris			-	

1) les 50% se rapportent au nombre maximum final de graines germées et non au total de graines ;
2) caractérisation relative : +++ (grande résistance) —> -- (résistance très restreinte);
3) sous des conditions optimales dans une chambre climatique ; environ 2 semaines après la germination, sauf si une autre période est indiquée (chiffre entre parenthèses = nombre de semaines).

Le tableau IV.3 indique les informations relatives aux propriétés caractérisant la période de croissance (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 112-119 ; Cissé, 1986) : la consommation d'eau par unité de biomasse produite (lié au type de mécanisme de photosynthèse, tableau IV.1), la répartition de la biomasse sur la partie aérienne et la racine, la réaction en fonction de la durée du jour pendant la germination et l'installation, et la caractérisation de la phase de floraison.

Tableau IV.3
Caractéristiques des espèces herbacées qui codéterminent fortement la production de la biomasse aérienne ; déterminées partiellement dans une chambre climatique (coefficient de transpiration et rapport pousse/racine), partiellement sur le terrain.

	coefficient de transpiration (l/kg)		pousse/ racine (g/g)		photopériodisme type[3]				phase de floraison[6]
			semaines[2]			longueur de la phase végétative (jours)			
	min.	moy.[1]	1	5		min.[4]	max.[4]	15/6[5]	1/8[5]
graminées annuelles :									
Aristida adscensionis	160	160	1	4		42	44	35	25

Aristida funiculata					II	12	35	33	22	
Aristida mutabilis	220	310		5						
Cenchrus biflorus	110	240	3	5	II	20	45	45	30	+++
Chloris pilosa						38	60			
Chloris prieurii						45	90			
Dactyloctenium aegyptium					II	11	62	40	30	++
Diheteropogon hagerupii	130	150	2	3	I	35	75		50	+
Echinochloa colona			2	8		29	29			
Elionurus elegans					I ?	11	48	50	40	+
Eragrostis tremula	180	230	5	9	7)	19	37			+
Loudetia togoensis	170	240		5	I ?	27	58	65	35	+
Panicum laetum	150	150	2	8	7)	11	33			+
Pennisetum pedicellatum	160	230	2	3	I	35	126	65	45	+
Schoenefeldia gracilis	150	260	3	5	II	30	70	65	35	+
graminées pérennes :										
Andropogon gayanus			2			49	160	85	60	+
légumineuses annuelles :										
Alysicarpus ovalifolius	210	410	1	3	II	20	50	35	30	+++
Cassia mimosoides					I	46	141	95	65	+++
Cassia tora	270	460		3	II	34	69	55	35	+++
Indigofera astragalina					I	31	106	65	45	+++
Zornia glochidiata	190	300	4	5	II ?	17	58	35	25	+++
autres :										
Blepharis linariifolia					II ?	37	59	55	45	++
Borreria chaetocephala			3		I	29	67	55	35	++
Borreria radiata	220	340	4	5	I	42	92	60	45	++
Borreria stachydea					I	34	95	55	45	++
Tribulus terrestris					7)	8	21			+++

---

1) moyenne, sur base de 5 observations au moins ;
2) nombre de semaines après la germination ;
3) voir texte ;
4) extrêmes observés après germination entre début avril et début novembre ;
5) relevés à Niono, Mali (14deg. 20' NB) ;
6) + : simple, +++ : multiple, ++ : intermédiaire ;
7) indications claires concernant une sensibilité pour la longueur du jour manquent ; espèce neutre ?

Plus la saison des pluies démarre tard, plus la floraison des espèces à photopériodisme de type I démarre rapidement, et plus leur phase végétative sera courte. Dans le cas du type II, ou l'induction de floraison intervient rapidement après la germination, la phase végétative est plus courte au fur et à mesure que le moment de germination s'éloigne de la journée la plus longue, diminuée de la durée de la période nécessaire pour l'induction de la floraison. Globalement, on peut dire que les espèces de la savane présentent un photopériodisme de type I, et les espèces du Sahel proprement dit, à celle de type II.

Pour esquisser les conséquences pour la durée de la phase de croissance végétative, le tableau IV.3 indique en plus des minima et maxima observés, la durée de la phase végétative dans le cas d'un démarrage précoce et d'un démarrage « normal » de la saison des pluies (germination effective respectivement le 15 juin et le 1er août ; de Ridder, 1979). On suppose dans ce dernier cas, qu'après l'induction de la floraison, directement après la germination, il n'y a pas eu des périodes de sécheresse telles, que le développement s'est arrêté temporairement.

La durée de la phase végétative est importante, car pour de nombreuses espèces cette période est celle de l'absorption active d'éléments nutritifs, et ce pour les espèces avec une phase de floraison unique, souvent brève (graminées avec épi unique, tableau IV.3). Par ailleurs, il existe des espèces qui continuent leur croissance après le début de la floraison. Les fleurs sont alors souvent situées dans les aisselles des feuille (par exemple pour les légumineuses) ou alors il s'agit d'espèces qui se ramifient au cours de leur croissance. Quelques rares graminées présentent également ce comportement : l'exemple le plus frappant est *Cenchrus biflorus*.

La combinaison des propriétés du tableau IV.3 détermine si les espèces peuvent pendant la saison de croissance, par le biais de la production de la biomasse, consolider la position qu'elles ont acquises pendant la germination et l'installation (tableau IV.2). La combinaison des propriétés figurant dans les tableaux IV.2 et IV.3 ainsi que la forme de croissance, déterminent la force concurrentielle des espèces. Dans les conditions de la savane et du sud du Sahel, la combinaison pérennité ou germination rapide - photosynthèse C_4 - croissance ascendante, est fortement compétitive. Dans les conditions du nord du Sahel, l'effet du mécanisme de photosynthèse C_4 est encore plus grand, alors que parallèlement à la germination rapide, la résistance à la sécheresse des plantules prend de l'importance (Cissé, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 126-129).

La dynamique des pâturages est, en ce qui concerne les propriétés végétales, déterminée, d'une part, par le succès (relatif) des différentes espèces par rapport à l'installation et la production de la biomasse, et d'autre part, par les possibilités qu'ont les espèces de convertir une partie de la biomasse en semences à vigueur germinative (Cissé, 1986 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 119-132 ; Bille, 1977). A cet égard le tableau IV.4 donne une récapitulation des propriétés des différentes espèces.

Contrairement aux propriétés des tableaux précités, les observations présentées ici pour une croissance dans des conditions optimales - les maxima - n'ont pas de signification directe pour la compréhension de la situation sub-optimale sur le terrain. La production de graines est déterminée davantage par le succès

d'une espèce pendant la germination, l'installation et la croissance, que par la potentialité de la production de graines par plante, dans des pâturages naturels sans engrais et non irrigués. La production maximale de graines par plante donne par contre une idée des possibilités pour les espèces, de continuer à assumer un rôle important ou d'assurer ce rôle, lorsque le pâturage est influencé par la pâture, l'apport de fumier et d'engrais chimique.

Dans le nord du Sahel, la production de graines est garantie malgré la grande variabilité dans la pluviosité, grâce au photopériodisme de type II et à la période de croissance végétative très brève lors d'une germination très précoce ou très tardive. Ce phénomène permet même plus d'un cycle de croissance par an avec production de graines.

A côté de la production de graines, la continuité peut être assurée grâce à la survie de certaines parties de plantes pendant la saison sèche. En fait, pour la strate herbacée, seule la survie du système racinaire a son importance ; c'est pourquoi la pérennité constitue un critère de classement dans les tableaux de cette partie. L'importance des espèces pérennes diminue rapidement du sud vers le nord, notamment sur les sols à infiltration homogène.

Tableau IV.4
Caractérisation de la production de graines des espèces herbacées.

	graines/plante		poids des graines (% biomasse)		N des graines (% de N total)		poids de de 1000 graines
	moy.	max.	moy.	max.	moy.	max.	(g)
graminées annuelles :							
Andropogon pseudapricus							0,3
Aristida funiculata[1)]	20		1				2,3
Aristida mutabilis[1)]	60		5				0,6
Brachiaria xantholeuca	40						2,2
Cenchrus biflorus	40	2782[2)]	10	18	25	50	2,1
Cenchrus prieurii							0,2
Chloris pilosa[1)]	50		4				0,5
Chloris prieurii[1)]	70		3				0,3
Ctenium elegans[1)]	62		1				0,2
Dactyloctenium aegyptium	80		2				0,3
Digitaria gayana[1)]	30		3				0,2
Diheteropogon hagerupii	410	1345 [2)]	3		31		0,9

Echinochloa colona[1)]	50		6				1,1
Elionurus elegans	120	287	3				0,4
Eragrostis tremula[1)]	60						0,05
Loudetia togoensis	30	79	3	5	29	38	2,5
Panicum laetum[1)]	70		5				1,4
Pennisetum pedicellatum[1)]	50		3				1,3
Schizachyrium exile[1)]	10		0,5				0,2
Schoenefeldia gracilis	350	16869 [2)]	6	13	19	34	0,2
Tragus racernosus[1)]	40						0,3
graminées pérennes :							
Andropogon gayanus[1)] [3)]	310		1				0,7
légumineuses annuelles :							
Aeschynomene indica							7,6
Alysicarpus ovalifolius	440	2408	9	31	20	63	3,5
Cassia mimosoides							3,6
Cassia tora[1)]	20						23,5
Indigofera astragalina[1)]	40		7				4,5
Indigofera diphylla[1)]	70						0,8
Indigofera prieuriana							5,5
Zornia glochidiata	10	616	16	31	33	55	1,9
autres :							
Blepharis linariifolia	40	723 [2)]	16	34	31	46	13,9[5)]
Borreria chaetocephala							1,0
Borreria radiata	20	3198	14	23	41	59	0,8
Borreria stachydea	40	94	16	19			6,6
Commelina forskalaei[1)]	3		0,1				0,1
Fimbristylis hispidula[1)]	83		1				0,2
Gisekia pharnacioides[1)]	69		2				0,3
Gynandropsis gynandra[1)]	31		1				0,6
Kohautia senegalensis[1)]	3		0,1				0,4
Mollugo nudicaulis[1)]	40		2				0,1
Polycarpaea linearifolia[1)]	85		4				0,3
Tribulus terrestris	660	2464	23	44	32 [4)]	44	1,1[5)]

Triumfetta pentandra[1)]	17	1,0

[1)] sur la base de quelques observations seulement ;
[2)] maxima observés sur les terrains d'expérimentation : monocultures irriguées, légèrement fertilisées ;
[3)] suivant Haggar (1967) ; il ne s'agit pas des graines par plante, mais par inflorescence ;
[4)] fruit entier ;
[5)] fruits pouvant être facilement confondus avec les graines !

IV.2.2. Répartition des espèces herbacées

Les propriétés des espèces présentées dans IV.2.1 déterminent (avec l'appétibilité, l'intensité d'exploitation et d'autres facteurs et caractéristiques) les habitats des espèces et la manière dont elles se manifestent. Le tableau IV.5 mentionne la répartition en fonction de la pluviosité et du substrat, en tenant compte de l'influence modificatrice du substrat sur la disponibilité en eau (Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 131 et 337-344). Boudet (1978) présente pour beaucoup d'espèces des renseignements comparables, mais plus détaillés. Pour les graminées pérennes des bassins, la durée et la profondeur d'inondation est indiquée globalement (tableau IV.6 ; Hiernaux, 1980a). L'influence de la sécheresse sur la répartition a déjà été mentionnée (II.3.6.2). Les isohyètes utilisées dans le tableau IV.5 sont encore celles valables avant la sécheresse (voir carte en annexe).

Tableau IV.5
Répartition [1)] des espèces herbacées par rapport à la disponibilité en eau et au substrat, pour des zones non-inondées ; observations personnelles au Mali central, au cours de la deuxième partie des années soixante-dix.

	isohyète[2)] (mm/an)	disponibilité en eau et substrat[3)]		
		I > *P* A - LS	*I* ~ *P* S	*I* < *P* SL - L
graminées annuelles :				
Andropogon pseudapricus	> 600	+		+
Aristida adscensionis	200-500			+
Aristida funiculata	200-500	+		+
Aristida mutabilis	< 400		+	
Brachiaria distichophylla	400-800		+	
Cenchrus biflorus[4)]	< 400		+	
Cenchrus prieurii	200-500		+	
Chloris prieurii	100-400			

Ctenium elegans	600-900		+	+
Dactyloctenium aegyptium	200-500		+	+
Digitaria gayana	400-800		+	
Diheteropogon hagerupii	300-700	+	+	+
Echinochloa colona	200-500	+		
Elionurus elegans	300-700		+	+
Eragrostis tremula	> 400		+	
Loudetia togoensis	> 500	+		+
Microchloa indica	400-1000			+
Panicum laetum	200-500	+		
Pennisetum pedicellatum	> 300	+	+	
Schoenefeldia gracilis	200-500	+	+	+
Setaria pallidifusca	300-500		+	
Tragus berteronianus	100-200		+	
graminées pérennes :				
Andropogon gayanus v. bisq.	> 700	+	+	
Andropogon gayanus v. trid.[5)]	400-700	+	+	
Cymbopogon schoenanthus[5)]	200-500		+	+
Leptothrium senegalense	100-200		+	
Sporobolus festivus	200-600	+		+
Tripogon minimus	> 400			+
légumineuses :				
Alysicarpus ovalifolius	100-400		+	
Cassia tora	400-700	+	+	
Indigofera astragalina		+		
Indigofera pilosa	300-800	+	+	+
Indigofera prieuriana	> 400	+	+	
Zornia glochidiata	200-800		+	+
autres :				
Achyranthes argentea	400-600	+	+	
Blepharis linariifolia	< 400		+	+
Boerhaavia repens	< 400		+	
Borreria chaetocephala	> 500		+	+
Borreria filifolia		+		

Borreria radiata	> 100		+	+
Borreria stachydea	> 400	+ +	+	
Ceratotheca sesamoides	400-600		+	
Cochlospermum tincturium	> 500		+	+
Commelina forskalaei	> 400		+	+
Corchorus tridens	> 300		+	+
Evolvulus alsinoides	> 300		+	+
Gisekia pharnacioides	< 500		+	+
Gynandropsis gynandra	< 500		+	+
Hibiscus asper	> 400		+	+
Hyptis suaveolens	< 500		+	
Ipomaea coscinosperma	> 400	+	+	
Ipomaea vagans	300-800		+	+
Kyllinga triceps	300-600		+	+
Lepidagathis anobrya	> 500	+		
Mollugo nudicaulis	> 300			+
Monechma ciliatum	> 400	+	+	
Pandiaka heudelotii	> 300	+	+	
Phyllanthus niruri	300-600		+	+
Polycarpaea eriantha	300-600			+
Portulaca oleracea	< 500		+	+
Tribulus terrestris	100-400		+	

---

1) voir aussi le tableau IV.6 et Boudet, 1978 ;

2) isohyètes sont celles valables avant la sécheresse (voir carte en annexe) ;

3) *I* = eau infiltrée ; *P* = pluviosité ; A = argile ; L = limon ; LS = sable limoneux ; SL = limon sablonneux ; S = sable. De nombreuses espèces présentes sur différents substrats sont souvent observées dans des situations où *I* < *P* dans le sud de leur domaine d'extension, et où *I* > *P* dans le nord ;

4) l'espèce est trouvée actuellement loin dans la savane, sur des champs et des jachères sableuses ;

5) espèces actuellememt disparues, sauf sur quelques endroits particuliers (tableau IV.7)

Tableau IV.6
Répartition des espèces herbacées des plaines d'inondation, par rapport à la hauteur maximum et à la durée d'inondation de l'habitat principal.

---

	durée (mois)	hauteur (m)	habitat principal

Andropogon gayanus v. *gay.*	0-1	0 -0,1	bordures sableuses et sablo-limoneuses
Brachiaria mutica	2-5	0,6-1,5	chenaux avec courant vif
Cynodon dactylon	0-1	0 -0,1	alluvions sableuses et sablo-limoneuses
Echinochloa pyramidalis	0-5	0 -1,5	répartition peu spécifique
Echinochloa stagnina	6-7	1,5-2,8	cuvettes profondes
Eragrostis barteri	0-5	0,1-1,5	plaines et hauts fonds
Hyparrhenia rufa	0-3	0 -0,6	levées et berges
Oryza longistaminata	4-5	0,6-1,5	plaines et cuvettes
Panicum anabaptistum	0-1	0 -0,1	buttes terreuses
Paspalum orbiculare	0-3	0 -0,6	plaines et hauts fonds
Setaria sphacelata	0-5	0 -1,5	répartition peu spécifique
Sorghum trichopus	0-1	0 -0,6	plaines et hauts fonds
Vetiveria nigritana	0-5	0 -1,5	répartition peu spécifique
Vossia cuspidata	6-7	1,5-2,8	cuvettes profondes

Suivant Hiernaux (1980a), donnant beaucoup plus de précision, et Boudet *et al*. (1972).

Le tableau IV.7 fournit des informations sur le type de présence et sur les facteurs écologiques qui jouent un rôle dans cette présence. Ce tableau est basé sur 2 à 4 années d'observations sur 70 sites, situés entre les isohyètes de 1000 et 200 mm, soit 208 relevés au total. Les rapports entre la fréquence et la contribution à la biomasse doivent être utilisés avec prudence, car un certain nombre de sites a été choisi pour leur spécificité plutôt que pour leur représentativité. Les données concernant la fréquence de la présence par rapport au taux dans la biomasse totale à la fin de la saison de croissance, ainsi que les données concernant les espèces localement très répandues, fournissent des informations sur la force concurrentielle réciproque d'espèces présentes dans une même région. La force concurrentielle augmente avec la diminution du rapport entre la fréquence et la contribution à la biomasse, pour les espèces à l'intérieur d'un même habitat (tableau IV.5), influencées par les mêmes facteurs écologiques (tableau IV.7 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 : pp. 126-129). Lorsque les facteurs qui créent ou renforcent une forte présence localisée sont connus, il est possible d'en déduire comment renforcer cette force concurrentielle. A l'aide d'une comparaison basée sur le type de présence, entre des espèces (relativement) peu connues et des espèces connues, les espèces inconnues peuvent être caractérisées provisoirement en fonction des propriétés présentées dans IV.2. Ceci peut être utile pour l'interprétation des observations sur le terrain (II.3.6).

Tableau IV.7
Fréquence d'observation des espèces herbacées par rapport à leur contribution à la production de la biomasse de la strate herbacée, à la fin de la saison de croissance ; avec indication des facteurs influençant positivement un ou les deux aspects.

	n[1)]	fréquence[2)] (%)	biomasse[2)] (%)	fréquence/ biomasse	dominance (locale)	
					caractère[3)]	facteur[4)] écologique
graminées annuelles :						
Andropogon pseudapricus	46	24	4	6	do	
Aristida adscensionis	86	19	0,5	38	i	
Aristida funiculata	16	38	12	3	do	
Aristida mutabilis	76	28	2	14	do	
Brachiaria distichophylla	26	18	2	9	i	
Cenchrus biflorus	114	38	7	5	do !	ru
Cenchrus prieurii	34	15	1	12	i	
Chloris pilosa	37	13	0,5	26	!	o
Chloris prieurii	34	27	3	9	!	fu
Ctenium elegans	13	36	4	9	i	
Dactyloctenium aegyptium	126	24	1	24	!	fu
Digitaria gayana	30	13	0,3	43	i	
Diheteropogon hagerupii	109	35	8	4		do
Echinochloa colona	5	10	10	1		
Elionurus elegans	123	35	4	9	(do) !	*I* << *P* ; ru
Eragrostis lingulata	7	12	0,0	[infini]	!	*I* >> *P*
Eragrostis pilosa	15	17	1	17	!	*I* >> *P*
Eragrostis tremula	112	35	1	35	(do) !	ru
Loudetia togoensis	86	27	3	9	do	
Microchloa indica	98	19	0,1	190	!	*I* << *P*V
Panicum laetum	60	28	4	7	do	*I* >> *P*
Pennisetum pedicellatum	81	28	7	4	!	o ; ru
Schizachyrium exile	37	11	0,3	37	!	Sq
Schoenefeldia gracilis	161	57	18	3	do	
Setaria barbata	8	33	8	4	do	
Setaria pallidifusca	53	19	0,5	38	!	o
Tragus berteronianus	12	52	6	9	do	
graminées pérennes :						
Andropogon gayanus v. trid.	15	13	7	2	!	Sq ; ru

Cymbopogon schoenanthus	10	10	4 2	!	Sq	
Leptothrium senegalense	5	98	48	2	do	
Sporobolus festivus[5)]	69	21	0,3	70	i	
Tripogon minimus[5)]	24	17	0,3	57	!	Sq
légumineuses:						
Alysicarpus ovalifolius	68	30	0,8	37	i	
Cassia mimosoides	70	14	0,1 140	i		
Cassia tora	29	18	2	9	!	fu
Indigofera aspera	33	18	0,3	60	i	
Indigofera astragalina	36	12	0,5	24	!	o ; hu
Indigofera pilosa	22	20	0,0	[infini]	i	
Indigofera prieuriana	45	12	0,1	120	i	
Zornia glochidiata	154	55	13	4	!	*I* << *P* ; fu
autres:						
Achyranthes argentea	22	12	1	11	!	o
Blepharis linariifolia	97	47	6	8	(do)	
Blepharis maderaspatensis	31	17	0,8	21	!	o
Boerhaavia repens	5	15	0,4	37	i	
Cleome monophylla	8	11	2	5	i	
Borreria chaetocephala	112	33	3	11	!	ru
Borreria filifolia	27	17	1	13	!	*I* >> *P*
Borreria radiata	139	40	4	10	(do) !	ru
Borreria stachydea	125	40	6	7	(do) !	ru ; hu
Ceratotheca sesamoides	13	28	1	28	i	
Cienfuegosia digitata	8	10	0,0	[infini]	!	*I* << *P*
Citrullus vulgaris	7	10	1	9	i	
Cochlospermum tincturium	9	22	2	11	i	
Commelina forskalaei	94	18	0,3	60	!	o
Corchorus tridens	45	15	0,2	75		
Cyperus compressus	6	15	1	15	i	
Cyperus reduncus	5	11	0,0	[infini]	i	
Euphorbia aegyptiaca	16	14	0,1	140	i	
Gisekia pharnacioides	12	31	1	26	i	
Gynandropsis gynandra	8	8	0,5	16		

Fimbristylis hispidula	85	28	0,1	280	i	
Hibiscus asper	23	9	0,3	30	i	
Hyptis suaveolens	10	16	0,0	[infini]	i	
Ipomaea coscinosperma	61	14	0,0	467	i	
Ipomaea vagans	20	28	0,0	[infini]	i	
Kohautia senegalensis	12	30	0,3	100	i	
Kyllinga triceps	32	12	0,0	[infini]	i	
Lepidagathis anobrya	28	16	0,3	53	!	*I* >> *P*
Merremia pinnata	28	25	0,5	50	i	
Mitracarpus scaber	8	18	0,2	90	!	ru
Mollugo nudicaulis	14	19	0,1	190	!	*I* << *P* ; Sq
Monechma ciliatum	58	21	1	21	!	o
Pandiaka heudelotii	91	17	0,3	57	i	
Peristrophe bicalyculata	8	11	0,0	[infini]	i	
Phyllanthus niruri	26	14	0,1	140	i	
Polycarpaea corymbosa	94	25	0,5	50	i	ru
Polycarpaea eriantha	18	17	0,7	24	!	*I* << *P* ; Sq
Polycarpaea linearifolia	5	11	0,4	27	i	
Portulaca oleracea	7	14	0,1	140	!	ru
Tribulus terrestris	17	25	0,5	50	!	fu
Triumfetta pentandra	10	14	1	11	!	o

[1)] nombre de relevés dans lequel l'espèce est présente, sur un total de 208 relevés ;
[2)] moyenne pour les relevés dans lesquels l'espèce est présente, sur base de 12 × 1 m² par relevé ;
[3)] do = dominance fréquente à l'intérieur de l'habitat de l'espèce ; (do) = dominance pour certaines années ; ! = dominance locale ; i = plantes individuelles réparties dans la végétation ;
[4)] information supplémentaire au tableau IV.5 : o = ombre ; *I* >> *P* = endroits humides ; Sq = sols peu profonds, souvent avec gravillons ; *I* << *P* = endroits à végétation (très) clairsemée et (forte) redistribution de l'eau de pluie ; fu = aux environs d'un village ou d'un puits, avec apport de fumier ; ru = espèce rudérale ;
[5)] espèces ayant une force concurrentielle et une productivité si faibles, qu'il n'est pas utile de les distinguer des graminées annuelles.

IV.2.3. Aspects qualitatifs des espèces herbacées

Le taux d'éléments nutritifs de la biomasse aérienne varie fortement au cours de la saison de croissance. Pour l'azote, ceci est illustré pour une graminée pérenne (figure IV.1a), une graminée annuelle très répandue (figure IV.1b) et une espèce dicotylédone, une légumineuse connaissant la fixation d'azote (figure IV.1c). Une récapitulation générale pour l'azote et pour le phosphore des espèces annuelles et pérennes est présentée séparément (tableaux IV.8 a, b et tableaux 9 a, b).

Figure IV.1

Evolution du taux d'azote de la biomasse aérienne d'Andropogon Gayanus (a), Schoenefeldia gracilis (b) et Zornia glochidiata (c) au cours des saisons.

La flèche indique le démarrage le plus tôt de la saison de croissance pour laquelle des échantillons ont été recueillis. Les phases de développement distinguées concernent: [carrée noir] végétatif; [carrée blanc] formation de tiges; [losange noir] génératif; [losange blanc] foin sur pied; [triangle noir] repousse. [triangle blanc] : échantillons de *Schoenefeldia gracilis* recueillis dans la phase générative sur un terrain près d'un point d'abreuvement, dominé par *Zornia glochidiata*.

Tableau IV.8

Evolution [1)] du taux [2)] d'azote (a) et de phosphore (b) de la biomasse aérienne par rapport à la croissance et au développement des espèces annuelles.

---

a : taux d'azote (g/kg) de différents stades d'évolution

	graines[3)]	végétatif			génératif			nécrotique		
		max.	min.	(n)[4)]	max.	min.	(n)	max.	min.	(n)
graminées annuelles :										
Andropogon pseudapricus			12			6			3	
Aristida mutabilis			20		15		5	6	4	
Cenchrus biflorus	40	43		8	22	19	6	45	13	4	37
Chloris prieurii	23		11			16				
Ctenium elegans						6				
Dactyloctenium aegyptium	22		32			20			4	
Diheteropogon hagerupii		26		7	10	11	2	28	8	1	8
Echinochloa colona						17			8	
Elionurus elegans			12		14		6	8		
Eragrostis tremula	30				16		5	12	7	3	6
Loudetia togoensis	38		13		9		4	9	4	
Oryza barthii			40							
Panicum laetum			30		30		12	6	14	6	5
Pennisetum pedicellatum			17		20		6	17	5	
Schizachyrium exile									7	
Schoenefeldia gracilis		29		8	23	18	3	68	15	3	40
Setaria pallidifusca			18							
légumineuses :										
Alysicarpus ovalifolius	67	41		5	8	30	5	17	25	15	2

Cassia mimosoides	38					23					
Zornia glochidiata	72	42		28	9	36		15	40	30		12	6
autres :											
Blepharis linariifolia	31					17		10	8		6		
Borreria radiata	34					26		9	24		8		
Commelina forskalaei			65			30							
Polycarpaea corymbosa											7		
Portulaca oleracea			35										
Tribulus terrestris			35			43		23	8				
Ipomaea verticellata						30							

b : taux de phosphore (g/kg) de différents stades d'évolution

	graines[3]	végétatif				génératif				nécrotique			
		max.		min.	(n)[4]	max.		min.	(n)	max.		min.	(n)
graminées annuelles :													
Andropogon pseudapricus			1,2				0,6				0,3		
Aristida mutabilis						1,5		0,7	8		0,6		
Cenchrus biflorus	4,3	4,8		1,0	12	2,3		0,5	43	1,5		0,3	34
Chloris prieurii	3,9		1,1				1,3						
Dactyloctenium aegyptium	4,7		2,1				1,6				0,2		
Diheteropogon hagerupii		2,5		0,5	10	1,6		0,2	28	0,7		0,2	8
Echinochloa colona							1,9				0,7		
Elionurus elegans			1,0			1,1		0,4	8				
Eragrostis tremula	4,1					2,4		0,3	12	1,0		0,2	6
Loudetia togoensis	5,6		1,0			1,1		0,3	8		0,2		
Oryza barthii			1,9										
Panicum laetum			2,4				2,8				0,7		
Pennisetum pedicellatum			1,6			3,8		2,6	19		0,5		
*Schoenefeldia gracilis**		2,6		0,4	20	2,2		0,4	64	1,5		0,1	38
Setaria pallidifusca			1,8										
légumineuses annuelles :													
Alysicarpus ovalifolius	5,8		1,8				3,4				1,3		
Zornia glochidiata	3,9	2,1		1,2	8	2,1		0,6	35	1,7		0,5	6
autres :													
Blepharis linariifolia	4,6					1,4		1,0	8				

Borreria radiata	4,9		2,3	0,7	12	
Commelina forskalaei		2,2	1,9			
Ipomaea verticellata			3,2			
Polycarpaea corymbosa						0,9
Portulaca oleracea		2,8				
Tribulus terrestris		2,7	4,2	1,4	8	

1) les données de Bartha (1970) et de Boudet (1978) ont été exploitées à côté des propres observations ;
2) les valeurs maximums en minimums ont été présentées dans le cas de cinq observations ou plus ; la valeur moyenne, ou même une seule valeur, est présentée dans les autres cas ;
3) sans de glume ;
4) (n) = nombre d'observations.

Tableau IV.9
Evolution du taux d'azote (a) et de phosphore (b) de la biomasse aérienne par rapport à la croissance et au développement des graminées pérennes, pour la plante entière et pour les feuilles et les tiges séparément.

	a : taux d'azote (g/kg) de différents stades de développement			
	végétatif	génératif	nécrotique	repousse
*Andropogon gayanus**	20 — > 5	9 —> 3	3	21 —> 9
feuille	20 — > 8	13 —> 6	10 —> 3	
tige	5	5 — > 3	2	
*Cymbopogon proximus**	16	8		
Cynodon dactylon		14		
Echinochloa pyramidalis	18	21	5	23
tige		6	3	
Echinochloa stagnina	26	13	5	26 —> 14
feuille	26			
tige		5	5	
Eragrostis barteri	19	8	5	22 —> 8
feuille		8		
tige		6	3	
Hyparrhenia rufa	16			14
feuille		10		
tige			2	

Oryza longistaminata	29	6	4	14
Panicum anabaptistum	14	8		15
feuille		14	6	
tige		6	3	
Setaria sphacelata	16		5	21
feuille		10	5	
tige		4	4	
Sorghum trichopus	14	4		
feuille		10	6	
tige			3	
Sporobolus helvolus[*]		26		
Vetiveria nigritana	16		5	19
feuille		10	5	
tige			4	
Vossia cuspidata	22			
feuille		22		
tige		5		

b : taux de phosphore (g/kg) de différents stades de développement

	végétatif	génératif	nécrotique	repousse
Andropogon gayanus	2,3 —> 0,7	1,6 [*] —> 0,5	0,7	2,6 —> 0,9
feuille		2,8 —> 1,0		
tige		1,1 — > 0,5	1,3 —> 0,6	
Cymbopogon proximus	2,2	2,2		
Cynodon dactylon		1,9		
Echinochloa pyramidalis	2,5	1,8	1,0	3,5
tige		0,8	0,7	
Echinochloa stagnina	3,2	1,9	1,1	2,0
feuille		2,2		
tige		1,4	0,6	
Eragrostis barteri	1,9	1,0	0,6	1,5
feuille		1,7		
tige		0,8	0,6	
Hyparrhenia rufa	2,1			1,8
feuille		2,0		

tige		0,9	0,4	
Oryza longistaminata	3,2	1,0	0,7	1,8
Panicum anabaptistum	2,2	1,8		2,1
feuille		1,8	0,7	
tige			0,4	
Setaria sphacelata	2,1		0,8	2,5
feuille		2,0		
tige		1,2	0,6	
Sorghum trichopus	1,5	2,9		0,6
feuille		1,0		
tige		0,5	0,3	
Sporobolus helvolus		2,3		
Vetiveria nigritana	2,0		1,1	2,6
feuille		1,1	0,6	
tige		0,4	0,9	
Vossia cuspidata		3,9		

* les échantillons ont été recueillies sur les plaines d'inondation relativement fertiles du delta central de Niger, à l'exception des trois espèces marquées ;
Observations personnelles et selon Traoré (1978).

La disponibilité relative en eau et en éléments nutritifs exerçant une grande influence sur le taux en éléments nutritifs, il se peut qu'une même espèce présente une grande variation en taux d'azote et de phosphore pour un même stade de croissance : la plupart des échantillons a été rassemblée pendant diverses années de pluviosité variable, sur des sols variant du sable à l'argile lourd, sur un trajet entre l'isohyète 200 et 1000 mm et sur des zones temporairement inondées ou non. La fertilité du sol aux endroits échantillonnés varie peu, aussi les différences dans les conditions de croissance sont déterminées notamment par des variations dans la disponibilité en eau. Une exception est faite pour les environs des points d'abreuvement, où l'apport de fumier, le ruissellement croissant et la stimulation de *Zornia glochidiata* vont de pair. Les graminées aussi peuvent avoir des taux élevés d'éléments nutritifs (figure IV.1b). On constate, en général, que lorsque l'apport d'engrais permet d'augmenter la disponibilité en éléments nutritifs, le taux d'azote et de phosphore augmente fortement (tableau IV.10).

Tableau IV.10
Influence de l'apport d'engrais sur la qualité des espèces herbacées, vus les taux maximums d'azote et de phosphore, observés au cours des phases végétative[1)] et générative en comparaison avec les valeurs moyennes sans fertilisation.

	taux d'azote (g/kg)				taux de phosphore (g/kg)			
	végétatif		génératif		végétatif		génératif	
	-[2]	+N[3]	- [2]	+N[3]	-[2]	+P[3]	-[2]	+P[3]
graminées annuelles :								
Aristida mutabilis			6	31			0,6	2,1
Cenchrus biflorus	23	41	12	25	2,3	4,4	1,2	3,3
Diheteropogon hagerupii	15	37	6	16	1,3	3,6	0,8	1,8
Elionurus elegans			8	27			0,7	3,0
Eragrostis tremula	12	39				4,1		
Loudetia togoensis	13	41	6	26	1,0	4,5	0,7	2,0
Pennisetum pedicellatum	17	45			1,6	3,5		
Schoenefeldia gracilis	17	46	9	21	1,3	6,0	1,0	2,0
légumineuses :								
Alysicarpus ovalifolius	34	48	23	50	1,3	6,4	1,6	4,6
Zornia glochidiata	34	49	24	33	1,6	4,5	1,3	2,8
autres :								
Borreria radiata		44	12	14		2,7	1,5	2,3

[1] plantes à l'age de 14 jours au moins ;
[2] non fertilisé ; valeur moyenne ;
[3] au moins fertilisé avec l'élément indiqué ; valeur maximum observée.

Les tableaux IV.8 et IV.9 diffèrent quelque peu. Le nombre d'observations concernant les graminées pérennes (tableau IV.9) était trop restreint pour obtenir une impression de la variation des taux d'azote et de phosphore en rapport aux conditions de croissance. Pour certaines espèces le tableau présente néanmoins deux valeurs pour un seul stade de développement. Il s'agit dans ce cas de l'évolution au cours du stade concerné, une chose importante pour les espèces pérennes, vu la longueur de leur période de croissance. Au fond il faudrait subdiviser la phase végétative en deux :« jeunes pousses » et « formation de tiges ». Suffisamment d'observations pour cela étaient disponibles seulement pour *Andropogon gayanus* : respectivement des taux d'azote de 20 —> 10 et 10 —> 5 g/kg, et des taux de phosphore de 2,3 —> 10 et 1,0 —> 0,7 g/kg. La sélectivité du bétail exige au moins pour les espèces pérennes, de distinguer entre les taux des feuilles et des tiges, et aussi d'analyser les repousses.

Le taux d'azote et de phosphore n'est pas seulement déterminé par les conditions de croissance (Breman *et al*., 1984), les différences d'espèces interviennent également. Ceci apparaît le plus clairement lors d'une comparaison entre les monocotylédones et les dicotylédones, entre les espèces C_3 et C_4, annuelles ou pérennes, et les espèces fixatrices ou non d'azote (tableau IV.1). Par ailleurs, la durée de la phase de croissance végétative joue un rôle (tableau IV.3). La sensibilité à la tombée des feuilles et aux

moisissures influence l'évolution des taux d'azote et de phosphore pendant la saison sèche ; une espèce ne perdant ses graines qu'au début de la saison des pluies (*Blepharis linariifolia*) dispose de foin sur pied qui est relativement riche en éléments nutritifs.

Le taux de cellulose brute est surtout une propriété propre à l'espèce ; l'influence des conditions de croissance est beaucoup plus indirecte que dans le cas du taux d'éléments nutritifs, notamment par l'influence exercée sur la présence des espèces. La digestibilité étant déterminé entre autres, par la structure végétale et le taux en protéines, elle occupe une position intermédiaire. Avec le taux de cendres, les propriétés mentionnées sont récapitulées pour les quatre groupes d'espèces distingués et par espèce dans les tableaux IV.11 et IV.12.

Tableau IV.11
Le taux de cendres[1)] de la biomasse aérienne des espèces diverses, et l'évolution[1)] du taux de cellulose brute par rapport à la croissance et au développement (les deux en g/kg de la matière sèche).

	cendres	cellulos *e* brute			
		végétatif[2)]	génératif		nécrotique
			début[3)]	fin[4)]	
graminées annuelles :	100[5)]	200-250	220-300	250-500	350-500
Aristida mutabilis	40- 80			360	410
Cenchrus biflorus	70-140	250	320	270-480	300-400
Dactyloctenium aegyptium	100-180	270		340	
Diheteropogon hagerupii	40-100	240	400	390-500	390
Echinochloa colona	160				280
Elionurus elegans	60-140		390		
Eragrostis tremula	30-100	260		360-420	320
Loudetia togoensis		280		370	
Panicum laetum	100-180	220	260	290	310
Pennisetum pedicellatum	80-140	290		280-410	420
Schoenefeldia gracilis	50-130	270-360	290-380	290-490	260-420
graminées pérennes :	110 [5)]	220-340	250-450	300-500	350-500
Andropogon gayanus	50-180	260-370	420	420	
feuille				290	
tige				470	
Cymbopogon schoenanthus	100	270			
Cynodon dactylon	130			270	

Echinochloa pyramidalis	150	250-360			350
tige				370	410
Echinochloa stagnina	130	300		320	390
feuille				310	
tige				330	
Eragrostis barteri	70	360			360
tige				410	
Hyparrhenia rufa	90	310		440	
feuille				350	
tige				490	
Oryza longistaminata	60-260	230-350		350	330
Panicum anabaptistum	80	270		340	
feuille				280	
tige				370	
Setaria sphacelata	130	250		430	
tige				460	
Sorghum trichopus	100	350			
feuille				360	340
tige				430	
Sporobolus helvolus	120		290		
Vetiveria nigritana	70-140	320		410	410
feuille				310-370	360
tige				440	
Vossia cuspidata	100		260		
feuille				250	
tige				230	
légumineuses annuelles :	80[5)]	200-300	250-400	350-500	400-500
Alysicarpus ovalifolius	60-120	270	350	370(330-440)	410
Zornia glochidiata	40-120	220		440	
autres :	150[5)]	150-280	190-300	250-450	300-450
Borreria radiata	130-320	220		250-370	
Commelina forskalaei	190	180	190		
Cyperus spp.	80-130	260	270		
Tribulus terrestris	170	170	250	170	

1) les valeurs maximums et minimums ont été présentées dans le cas de cinq observations ou plus ; la valeur moyenne, ou même une seule valeur, est présentée dans les autres cas ;
2) repousse après fauche ou dans la saison sèche y comprise ;
3) floraison et production de graines ;
4) mûrissement ;
5) valeur moyenne, les valeurs des espèces non spécifiées y comprise ;
Observations personnelles et selon Traoré (1978) et Diallo (1978).

Tableau IV.12
Evolution[1] de la digestibilité (%) de la matière organique par rapport à la croissance et au développement.

	digestibilité			
	végétatif[2]	génératif		nécrotique
		début[3]	fin [4]	
graminées annuelles :	77-65	75-55	60-30	50-30
Aristida mutabilis			43	49
Cenchrus biflorus	68	59	52-37	57-41
Dactyloctenium aegyptium	74		43	
Diheteropogon hagerupii	75		40	56
Echinochloa colona			59	
Eragrostis tremula			59-30	46
Loudetia togoensis	69		33	
Panicum laetum	74		73-50	50
Pennisetum pedicellatum	77		43	45
Schoenefeldia gracilis	68	59	55-33	53-44
graminées pérennes :	75-50	60-40	55-35	50-30
Andropogon gayanus	63-50	45	39	
feuille			56	
tige			29	
Cymbopogon schoenanthus	53			
Cynodon dactylon	60		54	
Echinochloa pyramidalis	69			38
tige			50	51
Echinochloa stagnina	76		74	63
feuille			74	

tige			73	
Eragrostis barteri	61			40
tige			29	
Hyparrhenia rufa	53			
feuille			50	
tige			35	47
Oryza longistaminata	74-64		53	49
Panicum anabaptistum	48			
feuille			42	
tige			26	
Setaria sphacelata	65			
tige			32	
Sorghum trichopus	54			
feuille			42	
tige			21	
Sporobolus helvolus			61	
Vetiveria nigritana	49			34
feuille			49-30	24
tige			18	
Vossia cuspidata	65			
feuille			66	
tige			72	
légumineuses :	75-60	65-50	60-40	50-30
Alysicarpus ovalifolius	69	59	57-46	
Zornia glochidiata				
autres :	80-65	75-60	70-40	60-30
Blepharis linariifolia			39	
Borreria radiata	65		70-53	
Commelina forskalaei	84	77		
Cyperus spp.	69		59	
Ipomaea verticellata		77	74	
Tribulus terrestris	72	60	77	

[1)] jusqu'à [4)] : voir tableau IV.11 ; observations personnelles et selon Diallo (1978).

Le taux de cendres varie beaucoup, mais sans aucune régularité en ce qui concerne l'habitat, la phase de développement et le groupe d'espèces. Ce taux n'est pas précisé donc par phase de développement.

Lorsqu'il n'est pas possible de procéder (ou de faire procéder) à des analyses de digestibilité dans le cadre de l'évaluation détaillée (II.4), les tableaux IV.11 et 5 sont utiles. S'il s'agit d'espèces non décrites ou lorsque la description est basée sur peu d'échantillons, ou encore si les taux de cellulose brute et d'azote observés divergent fortement des valeurs mentionnées dans les tableaux, utilisation peut être faite des formules établies par van der Meer & Breman (1991) à partir des données de base disponibles :

$$CD_{mo} = a + b \times [CB] + c \times [N] \qquad \text{(équation IV.1)}$$

$$CD_{mo} = a + b \times [CB] + c \times [N] + d \times [CB]^2 + e \times [N]^2 \qquad \text{(équation IV.2)}$$

dans laquelle :
CD = coefficient de digestibilité de la matière sèche (%) ;
[*CB*] = taux de cellulose brute (g/kg) ;

[*N*] = taux d'azote (g/kg) ;
a, b, c, d, e = coefficients de régression.

Le tableau IV.13 indique les valeurs de a, b, c, d et e par catégorie d'espèces pour l'ensemble des échantillons analysés, et séparément pour ceux de la phase générative. La prévisibilité de la digestibilité sur la base du taux de cellulose brute et d'azote est la plus fiable dans le dernier cas, vu les écarts-types présentés.

Si préférence est donnée à une caractérisation qualitative par l'intermédiaire des unités fourragères (UF) et des protéines digestibles (MAd ; Boudet, 1978 ; Rivière, 1978) plutôt qu'à la digestibilité et qu'au taux d'azote utilisés dans ce manuel, les tableaux IV.8, IV.9 et IV.11 peuvent servir pour calculer les valeurs de UF et de MAd.

Tableau IV.13
Equations pour l'estimation de la digestibilité[1] sur la base des taux de cellulose brute[2] et d'azote[3], et les valeurs numériques des coefficients correspondants par espèce et catégories d'espèces, par rapport au développement.

	stade de développement[4]	[sigma][5]	a	b	c	d	e
$CD_{mo} = a + b\,[CB] + c\,[N]$							

graminées annuelles[6]:	1	6	76	-0,09	+0,7		
Cenchrus biflorus	1	5	62	-0,05	+0,6		
	3	3	57	-0,05	+1,1		
Eragrostis tremula	1	3	131	-0,22	-1,0		
Schoenefeldia gracilis	1	5	65	-0,08	+1,1		
	3	3	37	0	+1,2		
graminées pérennes[6] **:**	1	11	79	-0,11	+0,6		
Andropogon gayanus	1	4	91	-0,12	0		
	2	2	82	-0,09	0		
Echinochloa pyramidalis	1	7	45	0	+1,0		
Hyparrhenia rufa	1	11	81	-0,09	0		
Vetiveria nigritana	1	5	52	-0,09	+1,0		
autres dicotylédones [6]**:**	1	9	65	-0,07	+0,6		
Borreria radiata	3	6	81	-0,07	0		
$CD_{mo} = a + b\,[CB] + c\,[N] + d\,[CB]^2 + e\,[N]^2$							
graminées annuelles :							
Panicum laetum	1	7	31	0	+2,9	0	-0,04
graminées pérennes :							
Echinochloa stagnina	1	9	55	0	+3,3	0	-0,12
Oryza longistaminata	1	5	27	+0,45	0	-0,0012	0
Sorghum trichopus	1	2	-11	+0,35	+1,7	-0,0007	0
légumineuses :	1	4	96	-0,34	+3,4	+0,0003	-0,08
Alysicarpus ovalifolius	1	2	156	-0,64	+2,2	+0,0008	-0,04
	3	2	144	-0,57	+2,1	+0,0007	-0,04

---

[1] CD_{mo}, en % de la matière organique ;

[2] [*CB*], en g/kg de la matière sèche ;

[3] [*N*], en g/kg de la matière sèche ;

[4] 1 = ensemble d'échantillons en provenance de différents stades de développement, de biomasse aérienne totale ou des parties de la plante ;

2 = biomasse aérienne totale, échantillonnage effectué uniquement pendant la phase végétative ;

3 = biomasse aérienne totale, échantillonnage effectué uniquement pendant la phase de formation des graines et de mûrissement ;

[5] écart type de la digestibilité estimée ;

[6] des espèces y comprises pour lesquelles une équation particulière manque, à cause du nombre restreint des observations.

IV.2.4. Espèces ligneuses

Pour la caractérisation taxonomique des espèces ligneuses, leur écologie et leur présence, on peut se référer à Geerling (1982). Les indications quant à leur valeur utilitaire en tant que producteur de fourrage, sont présentées dans les tableaux IV.14 et IV.15. Il ne s'agit que d'un nombre limité d'observations personnelles, la majorité provenant d'une synthèse d'observations effectuées par des tiers (Boudet & Toutain, 1980, CIPEA, 1975 ; Diagayété, 1981 ; Fotius & Valenza, 1966 ; de Leeuw, 1981 ; Klein *et al*. 1981 ; Le Houérou 1980a et 1980b ; von Maydell, 1981 ; Penning de Vries & Djitèye, 1982 ; Piot, 1969 ; Piot *et al*., 1980).

Tableau IV.14
Espèces ligneuses, groupées en légumineuses et autres, avec indication de leur appétibilité pour le bétail, et indication spécifique si les fruits sont mangés en plus des feuilles.

	auteur	famille	appétibilité*	consommation de fruits
légumineuses :				
Acacia albida	Del.	*Mimosaceae*	++	+
Acacia nilotica	(Linn.) Willd.	*Mimosaceae*	+	+
Acacia raddiana	Savi.	*Mimosaceae*	++	+
Acacia senegal	(Linn.) Willd.	*Mimosaceae*	++	+
Acacia seyal	Del.	*Mimosaceae*	++	+
Afzelia africana	Sm.	*Caesalpiniaceae*	++	
Bauhinia rufescens	Lam.	*Caesalpiniaceae*	++	+
Burkea africana	Hook	*Caesalpiniaceae*	(-)	
Daniellia oliveri	(R.) Hutch. et Dalz.	*Caesalpiniaceae*	+	
Detarium microcarpum	G. et Perr.	*Caesalpiniaceae*	-	
Dichrostachys glomerata	(Forssk.) Chiov.	*Mimosaceae*	+	+
Isoberlina doka	Craib et Stapf.	*Caesalpiniaceae*	(-)	
Parkia biglobosa	(Jacq.) Benth.	*Mimosaceae*	(-)	
Piliostigma reticulatum	(DC.) Hochst.	*Caesalpiniaceae*	+	+
Piliostigma thonningii	(Sch.) Miln.-Redh.	*Caesalpiniaceae*	+	+
Pterocarpus erinaceus	Poir.	*Papilionaceae*	++	+
Pterocarpus lucens	Lepr.	*Papilionaceae*	++	+
autres :				
Anogeissus leiocarpus	(DC.) G. et Perr.	*Combretaceae*	+	
Balanites aegyptiaca	(Linn.) Del.	*Zygophyllaceae*	++	+

Bombax costatum	Pell. et Vuill.	*Bombacaceae*	+	
Boscia angustifolia	A. Rich.	*Capparidaceae*	+	
Boscia senegalensis	(Pers.) Lam.	*Capparidaceae*	+	
Bridelia ferruginea	Benth.	*Euphorbiaceae*	+	
Butyrospermum paradoxum	(Gaertn. f.) Hepper	*Sapotaceae*	+	+
Cadaba farinosa	Forssk.	*Capparidaceae*	++	+
Cadaba glandulosa	Forssk.	*Capparidaceae*	++	
Capparis tomentosa	Lam.	*Capparidaceae*	+	
Combretum aculeatum	Vent.	*Combretaceae*	++	
Combretum ghasalense	Engl. et Diels (?)	*Combretaceae*	+	
Combretum glutinosum	Perr.	*Combretaceae*	-	
Combretum micranthum	G. Don.	*Combretaceae*	+	
Combretum nigricans	Lepr.	*Combretaceae*	-	
Commiphora africana	(A. Rich.) Engl.	*Burseraceae*	+	
Euphorbia balsamifera	Ait.	*Euphorbiaceae*	-	
Feretia apodanthera	Del.	*Rubiaceae*	++	
Gardenia erubescens	Stapf.	*Rubiaceae*	+	
Gardenia ternifolia	Schum.	*Rubiaceae*	+	
Grewia bicolor	Juss.	*Tiliaceae*	+	+
Grewia mollis	Juss.	*Tiliaceae*	(+)	
Guiera senegalensis	J.F. Gmel.	*Combretaceae*	+	+
Hyphaene thebaica	(Linn.) Mart.	*Palmae*		
Hymenocardia acida	Tul.	*Euphorbiaceae*		
Khaya senegalensis	(Desr.) A. Juss.	*Meliaceae*	++	+
Lannea acida	A. Rich.	*Anacardiaceae*	+	
Lannea velutina	A. Rich.	*Anacardiaceae*	(+)	
Leptadenia pyrotechnica	Forssk. Decne.	*Asclepiadaceae*	(+)	
Lophira lanceolata	Van Tiegh. ex Keay	*Ochnaceae*		
Maerua crassifolia	Forssk.	*Capparidaceae*	++	+
Salvadora persica	Linn.	*Salvadoraceae*	++	+
Sclerocarya birrea	(A. Rich.) Hochst.	*Anacardiaceae*	+	+
Terminalia avicennioides	G. et Perr.	*Combretaceae*	+	+
Vitex madiensis	Oliv.	*Verbenaceae*		
Ziziphus mauritiana	Lam.	*Rhamnaceae*	++	+

* ++ : mangées fréquemment par les chèvres et les dromadaires d'une manière générale, par les bovins et les moutons pendant la saison sèche ; + : mangées dans des conditions de pénurie ; - : peu ou pas mangées ; ( ) : peu d'informations disponibles ; synthèse suivant Kessler & Breman (en prép.).

Tableau IV.15
Taux d'azote [N], de cellulose brute ([CB]), de digestibilité (CD) et de tanin du fourrage d'espèces ligneuses classées en fonction de la partie de la plante et de l'âge.

	n[1)]	[*N*] (g/kg)		[*CB*] (g/kg)	CD_{mo}[3)] (%)		tanin[4)] (g/kg)	
		moy.	écart[2)]		1	2	1	2
légumineuses :								
Acacia albida								
fruit vert	11	19,2	16-21	210	63		42	30
fruit sèche	2	16,0						
feuille jeune	2	28,8		150				
feuille	7	26,0	16-29	179	50	52	43	28
fruit sèche	1	17,1		168				
graines	1	42,9		110				
Acacia nilotica								
fruit vert	2	20,8		140				
fruit sèche	3	16,0		180				
feuille	6	20,8	16-26	110	50		284	229
feuille sèche	2	22,4		100				
Acacia raddiana								
fruit vert	8	25,6	22-29	210				
fruit sèche	10	25,4	19-29	194				
feuille	7	27,2	21-29	140				
feuille sèche	1	22,4		140				
Acacia senegal								
fruit sèche	8	25,4	18-32	256				
feuille	8	39,1	29-48	151	65		24	11
Acacia seyal								
fruit vert	6	29,9		191				
fruit sèche	2	30,4	210					

feuille	21	25,6	18-38	148	54	59	170	140
Afzelia africana								
fruit	1	20,8		250				
feuille jeune	1	28,8		310				
feuille	1	19,2		400				
Bauhinia rufescens								
fruit vert	4	24,0		200	42		89	80
fruit sèche	4	17,6		300	40		34	29
feuille	7	25,6	21-35	170	57	46	32	24
feuille sèche	2	18,8		152	46		36	21
Daniellia oliveri								
feuille	7	24,0	14-37	230				
feuille jeune	2	25,1		199				
feuille sèche	1	25,6		320				
Dichrostachys glomerata								
fruit	2	25,6		140				
feuille	11	24,0	14-26	210		29		
Isoberlina doka								
feuille	4	22,4	16-30					
Piliostigma reticulatum								
fruit vert	5	14,4	11-16	210				
fruit sèche	4	11,2		210				
feuille jeune	6	24,0	18-37	180	66	29	29	10
feuille	5	24,0	16-35	100				
feuille sèche	2	17,6		250	39	16	53	43
Piliostigma thonningii								
fruit	2	16,0		250				
feuille	5	22,9	11-24	210				
Pterocarpus erinaceus								
fruit	3	19,2		260				
feuille jeune	3	22,4		270				
feuille	5	28,8	26-34	270				
feuille sèche	1	16,0		320				
Pterocarpus lucens								
fruit	2	25,6		300	63			

feuille jeune	2	40,0		170	60	64		
feuille	16	27,4	22-30	250	56	46	16	80
feuille sèche	6	21,3		248				
autres :								
Anogeissus leiocarpus								
feuille	5	19,2	-	140	38	33	250	186
feuille sèche	1	12,8		160				
Balanites aegyptiaca								
fruit	6	16,0		140				
feuille jeune	3	27,2		170				
feuille jeune+fleur	3	32,0		201				
vert feuille	8	22,4	17-29	150				
vert feuille+rameau	3	17,6		150				
alle feuille	23	22,5	13-32	159	59		15	5
feuille sèche	6	12,8		140				
Bombax costatum								
vert feuille	1	27,2		180				
feuille sèche	3	6,4	-	250				
Boscia angustifolia								
feuille	10	30,4	24-35	310	58		17	5
Boscia senegalensis								
fruit	1	27,2		110				
feuille jeune	5	48,4		150		72		
feuille	10	34,3	26-46	239	59	60	15	6
feuille sèche	4	33,6		220	60	50	15	6
Cadaba farinosa								
feuille	19	40,0	29-50	140	55	40	8	4
Cadaba glandulosa								
feuille	1	28,0		153				
Combretum aculeatum								
feuille	13	28,8	21-48	170	63	55	43	34
Combretum ghasalense								
feuille jeune	1	25,6		140				
feuille	3	20,8		260		43	?	106
Combretum glutinosum								

feuille jeune	1	27,2		90		48	?	256
feuille	11	17,6	16-24	190				
feuille sèche	1	12,8		200		30		
Combretum micranthum								
feuille	10	22,4	13-32	180		49		
Combretum nigricans								
feuille	12	22,4	14-40	190				
fruit	1	12,8		250				
Commiphora africana								
fruit	1	12,8		210				
feuille	4	22,4	-	130		43		
Gardenia erubescens								
feuille	8	12,8	8-24	260				
Gardenia ternifolia								
feuille sèche	1	14,4		250				
Grewia bicolor								
fruit	1	8,0		130				
feuille jeune	2	32,0		220				
feuille	7	24,4	21-27	190		55		
feuille sèche	4	12,8		190				
Guiera senegalensis								
fruit	1	24,0		320				
feuille jeune	4	26,6		245		18		
feuille	7	22,4	14-32	250	41	39	53	39
feuille sèche	2	16,0		250		12		
Hyphaene thebaica								
feuille jeune	1	14,7		335				
Hymenocardia acida								
feuille	1	16,0		300				
Khaya senegalensis								
feuille	4	27,2	13-37	200				
Lannea acida								
feuille	2	16,0						
Leptadenia pyrotechnica								
feuille	1	22,4		150				

Lophira lanceolata								
feuille	1	20,8		200				
Maerua crassifolia								
feuille	19	36,8	29-45	100		75	?	9
Salvadora persica								
feuille	7	20,8	-	120				
Sclerocarya birrea								
fruit	1	11,2		90				
feuille	8	16,0	10-21	90	36			
feuille sèche	3	11,6		168				
Terminalia avicennioides								
feuille jeune	1	31,0		112				
feuille	4	17,6		260				
Vitex madiensis								
feuille	1	20,8		194				
Ziziphus mauritiana								
fruit sèche	1	12,8		190				
feuille	18	24,1	18-30	141	54	51		
feuille sèche	1	12,8						

[1)] vaut uniquement pour le taux d'azote et de cellulose brute ; taux de tanin et digestibilité basés sur un ou quelques échantillons ;
[2)] - = écart restreint ;
[3)] 1 = digestibilité enzymatique (Diagayété, 1981) ; 2 = digestibilité in vitro ;
[4)] 1 = tous phénols ; 2 = seuls phénols de tanin ;
Synthèse suivant Kessler & Breman (en préparation).

IV.3. Glossaire

(Les termes *en italique* sont définis ailleurs dans le glossaire ; l'équivalent anglais des termes figure entre parenthèses.)

accessibilité (accessibility)
Utilisé généralement pour indiquer quelle fraction de *fourrage ligneux* peut être mangée par le bétail, compte tenu de la hauteur à laquelle il se situe sur l'arbre ou l'arbuste ; quantification en pourcentage de la quantité présente à un moment donné, ou de la production annuelle. Les bergers peuvent augmenter l'accessibilité au moyen de la coupe. Le *fourrage ligneux* disponible comprend les fruits tombés à terre, mais non les feuilles tombées. Le terme accessibilité est également utilisé pour qualifier le fourrage de pâturages situé à une distance pouvant être parcourue à pied depuis le puits ou le point d'abreuvement.

Les sous-produits agricoles sont souvent inaccessibles pour le bétail des éleveurs ne possédant pas de champs.

année à pluviosité **normale** (year with normal rainfall)
Une année avec une pluviosité telle que la probabilité d'années plus humides s'élève à 50 %.

année sèche (dry year)
Une année avec une pluviosité telle que la probabilité d'années plus humides s'élève à 90 %.

appétibilité (palatability)
Appréciation relative des plantes de pâturages et de parties de plantes, spécifique à une espèce animale et dépendante des possibilité de sélection.

biomasse (biomass)
Sans autre indication, la partie aérienne de la végétation ; quantification en kg/ha de *matière sèche*. La plupart du temps il est spécifié s'il s'agit de la *strate herbacée* ou des *espèces ligneuses*.

brouter (to browse)
Dans le manuel, utilisé notamment pour l'ingestion de fourrage par les *«ligniphiles»* , et pour l'exploitation du *pâturage aérien* par les *«herbiphiles»*.

capacité au champ (field capacity)
Situation dans laquelle un sol donné retient sa capacité maximale d'eau malgré la pesanteur. L'absorption d'eau hors d'un sol dans une telle situation requiert une succion déterminée. La succion nécessaire à la capacité au champ est fixée ici de celle d'une colonne de 315 cm d'eau ; exprimée succinctement par pF 2,5.

capacité de charge (carrying capacity)
La quantité de bétail qui, dans des conditions formulées avec précision, peut être maintenue dans une zone donnée ; quantification en UBT/ha ou en ha/UBT, en l'absence d'autres indications s'applique à une pâture tout au long de l'année. On distingue (par la formulation des conditions ; II.5.6) la capacité de charge standard, la capacité de charge dépendante du système et celle déterminée par les critères de gestion de l'environnement.

charge animal (stocking rate)
La quantité de bétail par unité de surface, généralement en fonction du besoin en fourrage qui en résulte par rapport à la *disponibilité* ; quantification en UBT/ha ou en ha/UBT. Sans autre indication, il s'agit d'une pâture continue d'une *unité de paysage* ou d'une région.

concentration des écoulements (runon)
- La concentration dans des parties relativement basses du paysage de l'eau de pluie ruisselant en surface;
- La quantité d'eau qui s'est rassemblée de cette façon ; quantification en tant que fraction des pluies

(mm/mm). Sans indication plus précise, il s'agit du total de pluie dans une *année normale*.

dégradation (degradation)
Utilisé notamment ici pour caractériser l'état de pâturages qui, par suite de modifications dans la végétation et/ou atteinte des caractéristiques physiques et/ou chimiques du sol, présentent une *production* substantiellement inférieure aux possibilités de l'écosystème concerné. La *disponibilité en eau et/ou en éléments nutritifs* et/ou encore en matière végétale biologiquement active (graines, systèmes racinaires permanents) est inférieure à ce qui est nécessaire pour réaliser la *production* d'origine.

digestibilité (digestibility)
Résultante des propriétés génétiques et des conditions de croissance des plantes, déterminant l'importance de la fraction de matière végétale dissoute et absorbée dans le système digestif du bétail. Est également fonction, notamment pour le *fourrage ligneux*, de la race de bétail. Quantification en pourcentage du fourrage, sur la base de la *matière sèche* totale ou de la *matière organique* seule. Parfois spécification pour une fraction de cette dernière, par exemple pour les protéines.

disponibilité en eau (availability of water)
La quantité d'eau de pluie infiltrée dans le sol, à portée au moins des racines de la strate herbacée. La profondeur maximum des racines de la *strate herbacée* est fixée à 2 m, ou moins lorsque le sol est peu profond. Quantification en mm/an.

disponibilité en éléments nutritifs, en azote, en phosphore (availability of nutrients, of nitrogen, of phosphorus)
La quantité d'éléments nutritifs qui peut être absorbée par la *strate herbacée* et/ou les *espèces ligneuses* dans le sol au cours d'une même saison de croissance ; quantification en kg/ha. La disponibilité est déterminée d'une part par les caractéristiques du sol, et d'autre part par la durée et la profondeur de l'humidification du sol. Dans le cas présent, l'attention a porté presque exclusivement sur la partie du sol potentiellement exploitable par le système racinaire de la *strate herbacée*, c'est-à-dire les 2 premiers mètres, ou moins si le sol est peu profond. On suppose que la disponibilité en graines germinatives et/ou en systèmes racinaires vigoureux des *espèces pérennes* au début de la saison des pluies, est suffisante pour que l'activité de la végétation ne soit pas le *facteur limitatif* de la production. Dans les pâturages dégradés et dans le Sahara, ceci ne sera pas d'application.

disponibilité fourragère (forage availability)
La production annuelle de fourrage, éventuellement de caractère spécifique, corrigée par les pertes et l'inaccessibilité ; quantification en kg/ha ou en pourcentage de la production annuelle, exprimé en *matière sèche*. Les pertes dont il est tenu compte sont dues à la pâture (indirecte uniquement), à l'herbivorie autre que celle de l'élevage et aux feux. Les exigences de la production animale et/ou de l'environnement peuvent constituer des raisons supplémentaires pour déclarer une partie de la production annuelle indisponible.

eau infiltrée (*I*) (infiltrated water)

Eau de pluie absorbée par le sol ; quantification en mm/an, à moins d'indication contraire. Estimée dans le manuel généralement de manière simple, sur la base de la pluviosité et de la redistribution des pluies suite au ruissellement et à la concentration des écoulements (I = (1-R) P, dans laquelle P représente la pluviosité et R le coefficient de ruissellement, lequel est négatif dans le cas de concentration des écoulements). Dans certains cas, une valeur plus précise de I est utilisée (*I*mo), obtenue par un modèle de simulation.

espèces annuelles (annuals)
Espèces végétales qui commencent leur cycle de vie annuel à partir de graines, par opposition aux *espèces pérennes*, disposant au minimum de structures souterraines (racines, bulbes, tubercules) qui leur permettent de survivre pendant la saison sèche. Les *espèces ligneuses* sont des *espèces pérennes* de forme optimale.

espèces herbacées (herbaceous species)
Voir *espèces ligneuses*.

espèces ligneuses (woody species)
Espèces végétales formant des structures lignifiées permettant de former pendant plusieurs années une base pour la production de feuilles, etc... En tant que telles, on les distingue des *espèces herbacées*.

espèces pérennes ou vivaces (perennials)
Voir *espèces annuelles*.

facteur limitatif (limiting factor)
Utilisé dans le manuel notamment en relation avec la production végétale, pour désigner le facteur le plus limitatif du niveau à atteindre. La plupart du temps la *disponibilité en éléments nutritifs* (notamment l'azote, mais suivi de près par le phosphore ; là où la quantité d'eau infiltrée disponible > 250 mm/an) ou en eau (si < 250 mm/an d'eau infiltrée disponible). Dans le cas de disponibilité insuffisante, la vitesse de croissance et/ou la durée de croissance est influencée négativement. Si la *disponibilité en eau* constitue le facteur le plus limitatif, il est question d'un niveau de production déterminé par la pluie ; s'il s'agit de la *disponibilité en azote* ou *en phosphore*, il est question d'un niveau de production déterminé par l'azote ou le phosphore. Ceci ne signifie pas que l'eau, l'azote ou le phosphore sont respectivement les facteurs les plus limitatifs pendant toute la période de croissance, freinant la vitesse de croissance.

fertilité du sol (soil fertility)
Utilisé presque uniquement dans le sens de la résultante *«disponibilité en élements nutritifs»* naturelle.

fourrage ligneux (browse)
La partie exploitable par le bétail des *espèces ligneuses*, donc rameaux, feuilles et fruits.

génisse (heifer)
Jeune femelle de race bovine dans la période entre le sevrage et la première fécondation.

«herbiphile» (grazer)
Espèce animale pour laquelle le fourrage des *espèces herbacées* domine le menu ; le *fourrage ligneux* n'est ingéré qu'en petites quantités ou dans le cas de nécessité.

intensité d'exploitation (exploitation intensity)
Voir *charge animale*.

légumineuses (leguminous species)
Groupe d'espèces végétales, formant ensemble la superfamille des *Leguminocea* (*Papilionaceae*, *Caesalpiniaceae* et *Mimosaceae*). La plupart des espèces peuvent profiter de l'azote atmosphérique grâce à la symbiose avec les bactéries *Rhizobia* , sans perdre pour autant le profit de l'azote contenu dans le sol. La plupart des autres espèces végétales ne peuvent disposer que de l'azote du sol.

«ligniphile» (browser)
Espèce animale pour laquelle le *fourrage ligneux* constitue toujours une partie importante du menu, même lorsque la *strate herbacée* offre suffisamment de fourrage de qualité acceptable.

lixiviation (leaching)
Lessivage d'éléments nutritifs hors de la zone racinaire par suite de *percolation*.

matière organique (organic matter)
La partie de matière vivante, ou de matière provenant d'organismes vivants, qui passe à l'état gazeux dans le cas de combustion. Il s'agit de la matière sèche moins ses minéraux.

matière sèche (dry matter)
Biomasse végétale séchée à l'air. Séchage d'échantillons de parties aériennes de la végétation ou de composants individuels, afin de quantifier d'une façon comparable la *production des pâturages* , la *disponibilité fourragère*, etc. Lorsque la possibilité est offerte, la préférence est donnée à un séchage effectué à une température donnée dans une étuve prévue à cet effet.

modèle (model)
Utilisé ici pour la description mathématique d'un processus (ou d'un complexe de processus) permettant de juger des résultats sans expérimenter le processus de manière répétitive ou de l'observer dans la nature. L'influence des conditions variables sur le résultat des processus en question peut être estimé à l'aide de calculs effectués par ordinateur (= *simulation*). Il s'agit notamment ici de déterminer la *disponibilité en eau* en fonction du sol et du climat, et de la *production* de pâturages dans des situations pour lesquelles cette disponibilité en eau est inférieure à 250 mm. La construction de modèles, la *simulation* et la vérification ont mené à la connaissance des propriétés des pâturages sur lesquelles les nombreuses équations présentées ont pu être établies. Ces équations doivent être considérées comme des modèles dans leur forme la plus simple, pouvant être utilisées en l'absence d'un ordinateur.

pâturage aérien (the browse producing plants of a certain area)
Les *espèces ligneuses* et leur *production* aérienne, en tant que composant des *pâturages naturels*. Elles produisent le fourrage (feuilles, rameaux et fruits) qui constitue notamment pour certaines espèces de bétail (chèvres, dromadaires) un composant important du menu.

pâturages naturels (rangelands)
Végétations naturelles influencées (fortement) ou non par la pâture, jachères, forêts et plaines d'inondations comprises.

pâturer (to graze)
Dans le manuel, utilisé notamment pour l'exploitation de la *strate herbacée* par le bétail.

percolation (percolation)
Le processus qui entraîne l'eau de pluie hors de la zone racinaire à cause de la pesanteur, risquant d'entraîner la *lixiviation*. L'enfoncement de l'eau en-dessous de la limite de 2 m est qualifié par le terme percolation. Dans le cas de sols peu profonds, il se produit plutôt un écoulement oblique souterrain sur la couche imperméable.

pertes d'azote (nitrogen losses)
Le plus souvent dans le manuel, la partie d'azote dans la biomasse aérienne de la végétation (ou de l'un des composants) qui est soustraite définitivement au système sol-végétaux. Ceci peut se produire par passage à l'état gazeux (par l'intermédiaire de processus de décomposition microbienne dans ou sur le sol, dans des herbivores, ou par les feux), par exportation (par l'intermédiaire des déplacements des herbivores, dont le bétail), et par lixiviation hors d'atteinte des racines.

pF (pF)
Le logarithme de la succion (exprimée en cm d'eau), qui est nécessaire pour absorber l'eau d'un sol avec un certain taux d'humidité.

photosynthèse (photosynthesis)
Le processus par lequel l'énergie solaire est fixée par les parties vertes des plantes, au profit de la vie et de la croissance de la plante. Une distinction est faite entre la photosynthèse C_3 et C_4, sur la base de la longueur de la chaîne de carbon du premier produit formé par la plante ; voir Larcher (1980) par exemple. La photosynthèse C_3 est optimale à 15-25 deg.C, allant de pair avec une consommation d'eau relativement élevée. Les espèces en question ont un taux minimum d'azote et de phosphore de respectivement 10 et 1 g/kg à la fin de la croissance, à l'exception des légumineuses. La photosynthèse C4 est optimale au-dessus de 30 deg.C ; consommation d'eau relativement faible ; taux d'azote et de phosphore 5 et 0,5 g/kg

point de flétrissement (wilting point)
L'état d'humidité d'un sol qui s'assèche, situation dans laquelle les plantes en phase de croissance

atteignent le point limite où elles ne peuvent plus absorber d'eau et finiront par se flétrir (à la longue). Pour absorber de l'eau dans une telle situation, une succion de celle d'une colonne de 15000 cm d'eau est nécessaire ; exprimée succinctement par pF 4,2.

production animale (animal production)
La plupart du temps, le gain de poids net sur une base annuelle ; quantification en kg/animal ou en kg/ UBT de poids vif. Egalement distinction (lait et viande), ainsi que quantification des effets de la production animale individuelle sur la productivité du troupeau.

production de pâturage (rangeland production)
Sans autre indication, l'accroissement annuel de la *biomasse* de la *strate herbacée* et/ou des *espèces ligneuses*, à l'exception de l'accroissement du bois ; quantification en kg/ha. Pour le composant annuel de la *strate herbacée*, cette production est réalisée pendant la saison des pluies, et à la fin de celle-ci - en l'absence de pâture et d'autre forme d'herbivorie -, le total de la *biomasse* aérienne sera environ équivalente à la production brute tout comme à la production nette. Pour le composant pérenne de la *strate herbacée*, distinction est faite entre la production pendant la période de croissance principale (pendant et peu après la période des pluies et/ou des inondations) et la production pendant la saison sèche, sur des plaines d'inondations séchées ou non. Pour ces *espèces pérennes*, il est question de la production nette, c'est-à-dire de la production annuelle, y compris la partie pâturée pendant la croissance, mais à l'exclusion des feuilles déjà perdues pendant la période de croissance principale par suite de mortalité ou de pourrissement. Les *espèces ligneuses* réalisent une partie de leur production en dehors de la saison des pluies ; la quantité maximale de feuilles constitue la base de l'estimation de la production. Pour la strate *herbacée* et les *espèces ligneuses*, les graines et les fruits font partie de la production.

rendement d'azote (nitrogen yield)
Le total d'azote dans la production aérienne annuelle de la végétation, à l'exception du bois (N_{lh}). La plupart du temps cela ne concerne que la *strate herbacée*, distinction étant faite entre la valeur moyenne définie théoriquement (N_b) et la valeur mesurée (N_m). Cette dernière valeur peut être standardisée (N_s) par étapes, par le biais de la valeur intermédiaire (N_i) ; quantification en kg/ha.

ruissellement (run-off)
- L'écoulement en surface de l'eau de pluie venant de tomber, suite à une capacité insuffisante d'absorption du sol, compte tenu de l'intensité de la pluie.
- L'eau s'écoulant ; quantification en tant que fraction de la pluie (coefficient de ruissellement ; mm/ mm). Sans autre précision, défini pour la quantité totale de pluie dans une *année normale*, par *unité de paysage* ou partie de celle-ci (SURru), et devant être distinguée en tant que telle des pertes en eau hors d'un bassin (III.2.4).

Sahel (Sahel)
Utilisé ici comme zone climatologique de l'Afrique occidentale, avec une pluviosité moyenne de 100 à 600 mm/an ; constitue dans certains pays sahéliens une grande partie du pays (Mauritanie, Niger, etc.)

alors que la Gambie est située entièrement au-delà. Deux parties sont distinguées : une partie nord (100-300 mm/an) et une partie sud (300-600 mm/an).

savane (savannah)
Utilisé dans le manuel pour une zone climatologique de l'Afrique occidentale, avec une moyenne pluviométrique de plus de 600 mm/an ; peu ou pas existante dans certains pays sahéliens (Mauritanie, Niger) mais la Gambie est entièrement concernée. Seule la savane soudanaise est traitée ici, zone entre 600 et 1200 mm/an isohyètes.

sélectivité (selectivity)
Choix du fourrage par le bétail, qui est déterminé par l'*appétibilité* relative, les possibilités physiques de l'espèce animale en question par rapport à la répartition dans l'espace des espèces et partie végétales à diverses *appétibilités* relatives, et par la *charge de bétail*.

simulation (simulation)
Dans le manuel, l'imitation de processus naturels à l'aide d'un ordinateur, après une description quantitative du processus sous la forme d'un *modèle*.

standardisation (standardization)
Dans le manuel, la tentative de calculer à partir du *rendement d'azote* mesuré d'une année quelconque, le *rendement d'azote* probable d'une *année normale*. La standardisation ne s'effectue que pour deux variables : pour la pluviosité et pour la contribution des *légumineuses* herbacées au *rendement d'azote*.

strate herbacée (herb layer)
La partie aérienne de la végétation, pour autant que cela concerne les *espèces herbacées*.

strate ligneuse (woody stratum)
La partie aérienne de la végétation, pour autant que cela concerne les *espèces ligneuses*.

taux d'humidité (water content)
Est considérée dans le manuel en relation avec le sol ; quantification en mm/mm^3 ou en mm/g de sol. Souvent spécifiée à la *capacité au champ* et au *point de flétrissement*. La différence entre les deux derniers taux d'humidité est en principe la quantité d'eau absorbable par la plante.

terres de parcours
Voir pâturages naturels.

texture du sol (texture)
Caractérisation du sol sur la base de la taille des grains et de la répartition de la taille des grains. Sur cette base, on distingue, par exemple, le sable, le limon et l'argile. *Capacité au champ* et *point de flétrissement* sont considérés ici comme dérivés de la texture seule.

unité bovine tropicale (UBT ; tropical livestock unit)
L'unité tropicale standard, un animal hypothétique de 250 kg de poids vif. Dans les pays sahéliens, on suppose que 1 UBT = 1,5 bovin = 10 moutons = 12 chèvres = 2 ânes = 1 cheval = 0,8 dromadaire.

unité de paysage (land unit)
Unité de classification pour une région à évaluer, avec certaines caractéristiques par rapport à la géologie, la géomorphologie, le sol, la végétation et l'utilisation notamment agricole dans le passé et le présent. L'homogénéité interne augmente avec l'échelle, en fonction du degré de détail de la classification.

IV.4. Liste des symboles et des abréviations

Pour la présentation des équations, des cartes et des tableaux il était nécessaire de faire figurer nombre de termes et de concepts sous la forme de symboles ou d'abréviations. Une partie importante de ces formes abrégées ont été reprises dans la liste ci-dessous. Ne sont pas repris dans la liste, les symboles très connus (par exemple kg, ha, mm), les abréviations figurant uniquement dans une petite partie du manuel, donc seulement près de leur introduction avec explication, ni les sigles d'instituts ou d'organisations.

a	variable dépendant du taux d'humidité à la capacité au champ
B	biomasse aérienne de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance (kg/ha)
*B*in	repousse pendant la saison sèche, dans les régions à inondations (kg/ha)
*B*pl	repousse pendant la saison sèche, dans les régions à production pluviale (kg/ha)
C_3	propriété d'espèce par rapport à la photosynthèse
C_4	propriété d'espèce par rapport à la photosynthèse
Ca	Calcium
CD_{ms}	coefficient de digestibilité de la matière sèche (%)
CD_{mo}	coefficient de digestibilité de la matière organique (%)
CS	capacité de stockage en eau de la surface du sol (mm)
CV	coefficient de variation
ED	ensemble détritique (unité de paysage dans l'évaluation globale)
EDsq	subdivision de ED ; sols peu profonds
EF	ensemble fluviatile ou lacustre (unité de paysage dans l'évaluation globale)
EF_{in}	subdivision de EF ; plaines d'inondation
EF_{ir}	subdivision de EF : terres irriguées
EFru	subdivision de EF ; plaines à ruissellement important

EF_{sh}	subdivision de EF ; bas-fonds à sols lourds et importante concentration des écoulements
ES	ensemble sablonneux (unité de paysage dans l'évaluation globale)
ES_{du}	subdivision ES ; dunes longitudinales
ES_{ps}	subdivision ES ; plaines sablonneuses
ETP	évapotranspiration potentielle (mm)
f	fraction moyenne d'azote perdue annuellement à partir de la biomasse aérienne de la strate herbacée
f_c	contribution à f à la suite de feux
$f_é$	contribution à f à la suite d'élevage
f_r	contribution à f par suite d'herbivorie autre que celle d'élevage (insectes, etcétéra)
f_v	contribution à f à la suite de volatilisation
f_{lh}	valeur de f pour les espèces ligneuses et la strate herbacée
f_{li}	valeur de f pour les espèces ligneuses
f_{pa}	valeur de f pour les espèces pérennes et les graminées annuellesV
$f_{pé}$	valeur de f pour les graminées pérennes
fix	partie d'azote dans la biomasse aérienne des légumineuses, résultant de la fixation symbiotique
F_{10}	N_b pendant années sèches (p10%) / N_b maximal
F_{50}	*N*b pendant années moyennes (p50%) / N_b maximal
F_{am}	N_b pendant l'année de mesure / N_b maximal
[*CB*]	taux de cellulose brute (g/kg)
GP	gain de poids (kg/jour par tête)
H	taux d'humidité du sol à pF 2,5 (cm3/cm3)
I	quantité d'eau infiltrée (suivant estimation grossière : $I = P \times (1\text{-}R)$; mm/an)
$I_dé$	quantité d'eau infiltrée sur partie d'une unité de paysage (dépressions) où il y a concentration des écoulements (mm/an)
I_{ho}	quantité d'eau infiltrée sur partie d'une unité de paysage, où l'eau s'infiltre de façon homogène (mm/an)
I_{ru}	quantité d'eau infiltrée sur partie d'une unité de paysage où l'eau ruisselle (mm/an)
I_i	quantité d'eau infiltrée par suite d'une pluie individuelle (mm)
I_{mo}	quantité d'eau infiltrée (suivant estimations précises avec modèle de simulation ; mm/an)

K	potassium
K_r	coefficient de ruissellement d'une unité de paysage
L	contribution des légumineuses à la production annuelle de la strate herbacée (%)
Mg	magnésium
MD	matière sèche digestible
MD_{ing}	matière sèche digestible ingérée (g/kg^{0,75} par jour)
MJ	MégaJoule
MS	matière sèche
MS_{ing}	matière sèche ingérée (g/kg0,75 par jour)
n	nombre
N	point cardinal : nord
N	azote
$[N]$	taux d'azote (g/kg)
$[N]_l$	taux d'azote des légumineuses (g/kg)
$[N]_{cd}$	taux d'azote à la limite entre les fourrages des groupes PROdé et PROsu à un coefficient de digestibilité donné de la matière sèche (g/kg)
$[N]_{sp}$	taux d'azote de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance (g/kg)
$[N]_{ss}$	taux d'azote de la strate herbacée à la fin de la saison sèche (g/kg)
N_{10}	quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée pendant une année sèche (p10% ; kg/ha)
N_a	quantité d'azote qui entre annuellement dans l'écosystème à partir de sources naturelles (kg/ha par an)
N_b	quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée ; valeur théorique (kg/ha)
N_i	valeur intermédiaire de rendement d'azote dans le cas de standardisation de N_m (kg/ha)
N_m	quantité totale mesurée d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance (kg/ha)
N_s	N_m après standardisation pour la contribution des légumineuses à la biomasse de la strate herbacée et pour la pluviosité (kg/ha)
N_{lh}	quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne des espèces ligneuses ainsi que des herbacées ; valeur théorique (kg/ha)
N_{ing}	azote ingéré par le bétail (g/kg0,75 par jour)
p10%	avec une probabilité de 10 %

p50%	avec une probabilité de 50 %
pr	profondeur du sol (cm)
pr_h	profondeur d'humidification du sol (cm)
pF	logarithme de la succion, exprimée en cm d'eau
P	phosphore
P	pluviosité moyenne (p50% ; mm/an)
Pe	quantité d'eau perdue par percolation (mm/an)
P_i	grandeur d'une pluie individuelle (mm)
PP	perte de poids (kg/jour par tête)
$PRO_{dé}$	fourrages avec un manque relatif de protéines
PRO_{su}	fourrages avec un surplus relatif de protéines
$PV^{0,75}$	(poids vif)^{0,75} = poids métabolique (kg)
rc	taux de recouvrement (%)
rc_p	taux de recouvrement par les graminées pérennes (%)
R	coefficient de ruissellement (si positif) ou de concentration des écoulements (si négatif)
R_i	ruissellement pour une pluie individuelle (mm)
RE_{pl}	repousses en saison sèche pour des régions exondées (kg/ha)
RE_{in}	repousses en saison sèche après retrait de l'eau d'inondation (kg/ha)
S	point cardinal : sud
S	soufre
S	capacité d'absorption du sol (mm/min$^{1/2}$)
$SUR_{dé}$	fraction de la surface où il y a concentration des écoulements (dépressions)
SUR_{ho}	fraction de la surface où l'eau s'infiltre de façon homogène
SUR_{ru}	fraction de la surface où l'eau ruisselle
TS	taux de sable (%)
UBT	Unité Bovine Tropicale, animal standard pour les tropiques, pesant 250 kg

Bibliographie

Ahn, P.M., 1970, West African soils, in West African agriculture, London, Oxford Univ. Press, 332 pp.

Albergel, J. & A. Bernard, 1984, Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées.

Estimation du ruissellement sur le bassin versant de Kazanga, ORSTOM, Ouagadougou.

Anon., 1983, Suivi de développement de l'élevage. Etude du troupeau dans la région de Sikasso, Cellule d'appui FAC à la DNE, Bamako.

ARC (Agricultural Research Council), 1980, The nutrient requirements of ruminant livestock, HMSO, London, 351 pp.

Audru, J. & R. Demange, 1972, Projet de développement de l'élevage dans le Mali-Sud. Agrostologie en alimentation du cheptel, avec annexes, travaux agrostologiques no. 16, IEMVT, Maisons-Alfort, 336 pp.

Barrère, J. & M. Slansky, 1965, Notice explicative de la carte géologique au 2.000.000 de l'Afrique occidentale (Républiques de Côte d'Ivoire, du Dahomey, de Guinée, de Haute-Volta, du Mali, de Mauritanie, du Niger, du Sénégal et du Togo), Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, no. 29, éd. BRGM, Paris.

Barth, H.K., 1977, Der Geokomplex Sahel. Untersuchungen zur Landschaftsökologie im Sahel Malis als Grundlage agrar- und weidewirtschaftlicher Entwicklungsplanung, Heft 71 Tübinger geographischen Studien, Geographischen Institut der Universität Tübingen, Tübingen, 234 pp.

Bartha, R., 1970, Plantes fourragères de la zone sahélienne d'Afrique, Afrika Studien Nr. 48, Weltforum Verlag, München, 306 pp.

Bartha, R., 1971, Studien zu Fragen der Zebu-Rinderzucht in den Tropen, Afrika-Studien no. 59, IFO-Institut für Wirtschaftsforschung, München, 172 pp.

Bell, R.H.V., 1982, The effect of soil nutrient availability on community structure in African ecosystems, in B.J. Huntley & B.H. Walker (Eds.), Ecology of tropical savannas, Springer Verlag, Berlin, pp. 193-216.

Berhaut, J., 1967, Flore du Sénégal, Editions Clairafrique, Dakar, 485 pp.

Berkhout, J.A.A. & H. van Keulen, 1986, Potential evapotranspiration, in H. van Keulen & J. Wolf (Eds.), Modelling of agricultural production : weather, soils and crops, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 63-75.

Betlem, J., 1989, The accuracy of the landscape guided vegetation survey, thesis International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, 41 pp.

Bille, J.C., 19**, Le ranch de Niono, Mali. Etude du milieu. D'après les documents de M. Haywood et P. Hiernaux, CIPEA, Bamako, 33 pp.

Bille, J.C., 1977, Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien, Travaux et Documents de l'ORSTOM no. 65, ORSTOM, Paris, 82 pp.

Birch, H.F., 1958, The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability, Plant and Soil 10, 9-31.

Birch, H.F., 1959, Further observations on humus decomposition and nitrification, Plant and Soil 11, 262-286.

Birch, H.F., 1960, Nitrification in soils after different periods of dryness, Plant and Soil 12, 81-96.

Blondel, D., 1971a, Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (Dior) au Sénégal, Agron. trop. 26, 1303-1333.

Blondel, D., 1971b, Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Sefa (Sénégal), Agron. trop. 26, 1334-1353.

Blondel, D., 1971c, Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical à Nioro-du-Rip (Sénégal), Agron. trop. 26, 1354-1361.

Boudet, G., 1978, Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères, série Manuels et précis d'élevage no. 4, IEMVT, Ministère de la Coopération, Paris, 258 pp.

Boudet, G. & P. Leclercq, 1970, Etude agrostologique pour la création d'une station d'embouche dans la région de Niono, étude agrostologique no. 29, IEMVT, Maisons-Alfort, 269 pp.

Boudet, G.C. & B. Toutain, 1980, The integration of browse plants within pastoral and agropastoral systems in Africa, in H.N. Le Houérou, (Ed.), Browse in Africa. The current state of knowledge, Papers presented at the International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, April 8-12, 1980, ILCA, Addis Ababa, pp. 472-432.

Bourn, D. & W. Wint, 1986, Pastoral condition in Central Niger following the 1983/84 drought, ILCA, Addis Ababa, 37 pp.

Breman, H., 1975, La capacité de charge maximale des pâturages maliens, in Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux Africains, Actes du colloque, Bamako-Mali, 3-8 mars 1975, ILCA, Addis Abeba, pp. 249-256.

Breman, H. (Ed.), 1982, La capacité de charge des pâturages sahéliens pour les systèmes d'élevage de la région, Compte-rendu de la table ronde, CABO, Wageningen, p. 73.

Breman, H., 1987, The struggle of the green against the yellow dragon. The Chinese approach to desertification control and its usefulness for the Sahel, CABO, Wageningen, 62 pp.

Breman, H. & A.M. Cissé, 1977, Dynamics of Sahelian pastures in relation to drought and grazing, Oecologia (Berl.) 28, 301-315.

Breman, H. & L. Diarra, 1991, Méthodologie pour le suivi léger des ressources pastorales au Sahel, rapport CABO, no, 102, CABO, Wageningen.

Breman, H. & H.G. van der Meer, 1992, Digestibility of fodders from Sahelian rangelands, (en préparation).

Breman, H. & N. Traoré (Eds), 1986a, Analyse des conditions de l'élevage et propositions de politiques et de programmes, République du Niger, SAHEL D(86)284, OCDE/CILSS/Club du Sahel, Paris, 194 pp.

Breman, H. & N. Traoré (Eds), 1986b, Analyse des conditions de l'élevage et propositions de politiques et de programmes, Burkina Faso, SAHEL D(86)300, OCDE/CILSS/Club du Sahel, Paris, 202 pp.

Breman, H. & N. Traoré (Eds), 1987, Analyse des conditions de l'élevage et propositions de politiques et de programmes, Mali, SAHEL D(87)302, OCDE/CILSS/Club du Sahel, Paris, 243 pp.

Breman, H. & P.W.J. Uithol (Eds.), 1986, Le projet Production Primaire au Sahel (PPS) ; Survol, deuxième version, révisée et actualisée, CABO, Wageningen, 117 pp.

Breman, H. & C.T. de Wit, 1983, Rangeland productivity and exploitation in the Sahel, Science 221, 1341-1347.

Breman, H., A. Diallo, G. Traoré & M.A. Djitèye, 1978, The ecology of the annual migration of cattle in the Sahel, Proc. First International Rangeland Congress, Society of Range Management, Denver, Colorado, USA, pp. 592-595.

Breman, H., A.M. Cissé, M.A. Djitèye & W.Th. Elberse, 1980, Pasture dynamics and forage availability in the Sahel, Isr. J. Bot. 28, 227-251.

Breman, H., H. van Keulen & J.J.M.H. Ketelaars, 1984, Land-evaluation for semi-arid rangeland : A critical review of concepts, in W. Siderius (Ed.), Proceedings of the Workshop on land evaluation for extensive grazing, Addis Ababa, 1983, ILCA, ITC et FAO, ILRI, Wageningen, pp. 229-244.

Breman, H., J.J.M.H. Ketelaars & N. Traoré, 1990, Un remède contre le manque de terre ? Bilan des éléments nutritifs, production primaire et élevage au Sahel, Sécheresse 2, 109-117.

Brouwers, M. & B. Keita, 1976, Annexes de M. Brouwers & M. Raunet, 1976, étude morphopédologique du plateau Mandingue (cercle de Kita et région de Faladie) au 1/200.000 en vue de son développement agricole, rapport Institut de Recherches et Agronomiques Tropicales et de Cultures Vivrières (IRAT), République du Mali.

Bruin, B. de, F.W.T Penning de Vries, L.W. van Broekhoven, N. Vertregt & S.C. van de Geijn, 1989, Net nitrogen mineralization, nitrification and CO2 production in alternating moisture conditions in an unfertilized low-humus sandy soil from the Sahel, Plant and Soil 113, 69-78.

Budelman, A. & P.M. Zander, 1990, Land-use by immigrant Baoulé farmers in the Taï region, South-west Côte d'Ivoire (Ivory Coast), Agroforestry Systems 11, 101-123.

Casenave, A. & C. Valentin, 1990, Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, Editions de l'ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, Bondy, 230 pp.

Charreau, C., 1961, Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal, Agron. trop. 16, 504-561.

CIEH, 1965, République du Mali. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965, Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, ORSTOM, Service Hydrologique, 1081 pp.

Chigaru, P.R.N. & D.H. Holness, 1983, Estimation of body water and fat in cattle using tritiated water space and live weight with particular reference to the influence of breed, J. agric. Sci. 101, 257-264.

CIEH, 1974, Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965, République du Mali, Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, Ministère de Coopération, République française, Paris, 1081 pp.

CIPEA, 1978, Evaluation des productivités des races bovines Maure et Peul à la station du Sahel, Niono, Mali, CIPEA Monographie no. 1, Addis Abeba, 128 pp.

CIPEA, 1975, Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux Africains, Actes du colloque, Bamako-Mali, 3-8 mars 1975, ILCA, Addis Abeba, 399 pp.

Cissé, M.I., 1980, The browse production of some trees of the Sahel : relationships between maximum foliage biomass and various physical parameters, in H.N. Le Houérou, (Ed.), Browse in Africa. The current state of knowledge, Papers presented at the International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, April 8-12, 1980, ILCA, Addis Ababa, pp. 205-211.

Cissé, A.M., 1986, Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud-sahélienne, thèse, Université agronomique, Wageningen, 211 pp.

Cissé, M.I. & H. Breman, 1980, Influence de l'exploitation sur un pâturage à Andropogon gayanus

Kunth var. tridentatus, Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop. 33, 407-416.

Cissé, L. & G. Vachaud, 1987, Effet d'un amendement organique sur l'infiltration, les coefficients de transferts hydriques, et l'évaporation d'un sol sableux dégradé du Nord-Sénégal, Hydrol. continent. 2, 15-28.

Cochemé, J. & P. Franquin, 1967, Une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du Sahara en Afrique occidentale, Technical Report no. 86, World Meteorological Organisation, Geneve, 136 pp.

Coe, M.J., D.H. Cumming & J. Phillipson, 1976, Biomass and production of large African herbivores in relation to rainfall and primary production, Oecologia (Berl.) 22, 341-354.

Cohen, R.D.H., D.L. Garden & J.P. Langlands, 1980, A note on the relationship between live weight and the incidence of oestrus in Hereford heifers, Anim. Prod. 31, 221-222.

Daget, Ph., & J. Poissonet, 1971, Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application, Annales agronomiques 22, 5-41.

Dahl, G. & A. Hjort, 1976, Having herds. Pastoral herd growth and household economy, Stockholm studies in Social Antropology.

Dancette, C., 1970, Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux de Sénégal. Intérêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide, Agron. trop. 25, 225-240.

Dancette, C., 1971, Contrôle avec l'humidimètre à neutron de l'alimentation hydrique d'une culture de mil pendant deux hivernages très différents, Agron. trop. 26, 721-735.

Dancette, C., 1973, Principales études de l'IRAT au Sénégal portant sur les charactéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et sur leurs aptitudes à l'irrigation, Agron. trop. 28, 887-893.

Davey, J.T., 1958, The African migratory locust (Locusta migratoria migratorioides Rch. & Frm., Orth.) in the central Niger delta. Part one : Climate and vegetation, Locusta no. 5, OICMA, Nogent-sur-Marne, 115 pp.

Demarquilly, C. & Ph. Weiss, 1970, Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages, étude no. 42, SEI, Versailles, 65 pp.

Deneve, R. & R. Beck, 1982, Rapport final du projet APPAM. Phase ITC. Amélioration des pâturages et de la production animale en Mauritanie, ITC, Enschede, 103 pp.

Diagayété, M., 1981, Untersuchungen zur Erweiterung der Kenntnisse über den Futterwert westafrikanischer Futterpflanzen, Dissertation zur Erlangung des Grades eines Dokters der Agrarwissenschaft, Institut für Tierernährung, Universität Hohenheim.

Diallo, A., 1978, Transhumance : comportement, nutrition et productivité d'un troupeau zébus de Diafarabé, thèse, Centre Pédagogique Supérieur, Bamako.

Diarra, L., 1983, Production et gestion des parcours sahéliens : synthèse de cinq années de recherches au Ranch de Niono, Programme des zones aride et semi-aride, document de programme no. AZ 94, ILCA, Addis Abeba, 82 pp.

Dicko, M.S. & M. Sangaré, 1984, Le comportement alimentaire des ruminants domestiques en zone sahélienne, document de programme no. AZ 101 B, CIPEA, Bamako, 13 pp.

Dijkerman, J.C., 1975, Moisture regimes of some soils in Sierra Leone, M.Sc.-course in soil science and water management, Agricultural University, Wageningen.

Djitèye, M., 1981, Influence de l'exploitation sur un pâturage sahélien à annuelles (Niono-Mali), DEA, Ecologie végétale, Orsay.

Djitèye, M., 1988, Composition, structure et production des communautés végétales sahéliennes : application à la zone de Niono (Mali), thèse Université de Paris-sud, 105 pp.

Dobben, W.H. van, 1962, Influence of temperature and light conditions on dry-matter distribution, development rate and yield in arable crops, Neth. J. agric. Sci. 10, 377-389.

Downton, W.J.S, 1975, The occurrence of C4 photosynthesis among plants, Photosynthetica 9, 96-105.

Driessen, P.M., 1986, The water balance of the soil, in H. van Keulen & J. Wolf (Eds.), Modelling of agricultural production : weather, soils and crops, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 76-116.

Dye, P.J. & P.T. Spear, 1982, The effects of bush clearing and rainfall variability on grass yield and composition in South-West Zimbabwe, Zimbabwe J. agric. Res. 20, 103-118.

Elberse, W.Th. & H. Breman, 1989, Germination and establishment of Sahelian rangeland species. I. Seed properties, Oecologia 80, 477-484.

Elberse, W.Th. & H. Breman, 1990, Germination and establishment of Sahelian rangeland species. II. Effects of water availability, Oecologia 85, 32-40.

Elliott, R.C., 1967, Voluntary intake of low-protein diets by ruminants. I, J. agric. Sci. 69, 375-382.

Elliott, R.C. & K. Fokkema, 1960, Protein digestibility relationships in ruminants, Rhod. agric. J. 57, 301-304.

Elliott, R.C. & K. Fokkema, 1961, Herbage consumption studies on beef cattle. I, Rhod. agric. J. 58, 49-57.

Elliott, R.C. & J.H. Topps, 1963a, Studies of protein requirements of ruminants. 1. Nitrogen balance trials on two breeds of African cattle given diets adequate in energy and low in protein, Brit. J. Nutr. 17, 539-547.

Elliott, R.C. & J.H. Topps, 1963b, Studies of protein requirements of ruminants. 1. Protein requirements for maintenance of three breeds of cattle, Brit. J. Nutr. 17, 549-556.

Elliott, R.C. & J.H. Topps, 1964, Studies of protein requirements of ruminants. 3. Nitrogen balance trials on Blackhead Persian sheep given diets of different energy and protein content, Brit. J. Nutr. 18, 245-252.

Elliott, R.C., K. Fokkema & C.H. French, 1961, Herbage consumption studies on beef cattle. II, Rhod. agric. J. 58, 124-130.

Elliott, R.C., W.D.C. Reed & J.H. Topps, 1964, Studies of protein requirements of ruminants. 4. Liveweight changes of two breeds of African cattle given three levels of dietary protein each with varying amounts of digestible energy, Brit. J. Nutr. 18, 519-528.

Fall, A., M. Diop, J. Sanford, Y.J. Wissocq, J. Durkin & J.C.M. Trail, 1982, Evaluation of the productivities of Djallonke sheep and N'Dama cattle at the Centre de Recherches Zootechniques, Kolda, Senegal, ILCA Research Report no. 3, ILCA, Addis Ababa.

FAO, 1984, Agroclimatological data. Données agroclimatologiques. Africa 1. Volume 1. Countries north of the equator. Volume 1. Pays au nord de l'équateur, FAO Plant Production and Protection Series no. 22, FAO, Rome.

FAO, 1987, Guidelines : land evaluation for extensive grazing, FAO Soils Bulletin, troisième ébauche, 104 pp.

FAO-Unesco, 1977, Soil map of the world 1 : 5.000.000. Volume VI Africa, Unesco, Paris.

Farquhar, G.D., R. Wetselaar & B. Weir, 1983, Gaseous nitrogen losses from plants, in J.R. Freney & J. R. Simpson, Eds, Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems, Developments in Plant and Soil Sciences, Vol. 9, Martinus Nijhoff/Dr. W.Junk Publ., La Haye, pp. 159-180.

Fotius, G. & J. Valenza, 1966, Etude des pâturages naturels du Ferlo-Oriental (République du Sénégal), étude agrostologique no. 13, IEMVT, Maisons-Alfort, 180 pp.

Geerling, C., 1982, Guide de terrain des ligneux sahéliens et soudano-guinéens, Mededelingen Landbouwhogeschool 82-3, Wageningen.

Gillard, P. & W.Th. Elberse, 1982, The effect of nitrogen and phosphorus supply on the competition between Cenchrus biflorus and Alysicarpus ovalifolius, Neth. J. agric. Sci. 30, 161-171.

Godron, M., Ph. Daget, L. Emberger, G. Long, E. Le Floc'h, J. Poissonet, Ch. Sauvage & J.-P. Wacquant (Réd.), 1969, Vade-mecum pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu, Extrait du Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 169 pp.

Goudriaan, J., 1977, Crop micrometeorology : A simulation study, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 249 pp.

Goudriaan, J., 1986, A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis, Agric. and Forest Meteorol. 38, 249-254.

Grouzis, M., 1988, Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso), collection études et thèses, Editions de l'ORSTOM, Paris, 336 pp.

Hadas, A. & E. Stibbe, 1973, An analysis of soil water movement toward seedlings prior to emergence, in A. Hadas, D. Swartzendruber, P.E. Rijtema, M. Fuchs & B. Yaron (eds.), Physical aspects of soil water and salts in ecosystems, Ecological studies 4, Springer Verlag, Berlin, pp. 97-106.

Haecker, T.L., 1920, Investigations in beef production, Bull. Univ. Minnesota nr. 193, 111 pp.

Haggar, R.J., 1967, The production of seed from Andropogon Gayanus, Samaru Res. Bull. 80, 251-259.

Harpaz, Y, 1975, Simulation of the nitrogen balance in semi-arid regions, thesis, Hebrew University, Jerusalem, 134 pp.

Heemst, H.D.J. van, 1986, Physiological principles, in H. v. Keulen & J. Wolf (Eds.), Modelling of agricultural production : Weather, soils and crops, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 13-26.

Heetman, H., M. Bloemberg & J. van der Veer, 1987, Introduction à l'utilisation de photographies aériennes au service de l'enseignement supérieur au Mali, Dép. de Géodésie, LUW, Wageningen, 103 pp.

Held, J. den, 1983, Rangeland productivity and exploitation in Bor District, Rural development activities Sudan, techn. note no. 2, ILACO, Arnhem.

Hendricksen, R., K.G. Rickert, A.J. Ash & G.M. McKeon, 1982, Beef production model, in Animal production in Australia, Proc. of the Australian Soc. of Animal Production 14, 204-208, Pergamon Press, Sydney.

Hiernaux, P., 1980a, La carte des ressources fourragères des parcours du delta intérieur du Niger. Notice, CIPEA, Bamako, 98 pp.

Hiernaux, P., 1980b, Inventory of the browse potential of bushes, trees and shrubs in an area of the Sahel in Mali. Method and initial results, in H.N. Le Houérou, (Ed.), Browse in Africa, The current state of knowledge, Papers presented at the International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, April 8-12, 1980, ILCA, Addis Ababa, pp. 197-203.

Hiernaux, P., 1985, Encore une saison des pluies très déficitaire sur le ranch de Niono (Sud Sahel - Mali). Evolution de la végétation d'une cinquantaine de sites suivis depuis 1976, Programme des zones aride et semi-aride, document de programme N.AZ 141, CIPEA, Bamako, 15 pp.

Hiernaux, P. & L. Diarra, 1983, Pâturages de la zone d'inondation du Niger, in R.T. Wilson, P.N. de Leeuw & C. de Haan (Eds.), Recherches sur les systèmes des zones arides du Mali : résultats préliminaires, CIPEA rapport de recherche no. 5, ILCA, Addis Abeba, 189 pp.

Hiernaux, P., L. Diarra & A. Maiga, 1989, Dynamique de la végétation sahélienne après sécheresse. Un bilan du suivi des sites pastoraux du Gourma en 1988, document de programme DP AZ 192, CIPEA, Bamako, 46 pp.

Hillel, D., 1968, Soil surface evaporation and means of minimizing it, Final techn. Rep., Proj. no. A10-SWC-32, submitted to USDA.

Hillel, D., 1971, Soil and water. Physical principles and processes, Academic Press, New York/London, 288 pp.

Hillel, D., 1977, Computer simulation of soil-water dynamics. A compendium of recent work, IRDC, Ottawa, 214 pp.

Hofmann, R.R., 1973, The ruminant stomac, East Afr. Literature Bureau, Nairobi.

Hoogmoed, W.B. & L. Stroosnijder, 1984, Crust formation on sandy soils in the Sahel. I. Rainfall and infiltration, Soil and Tillage Research 4, 5-23.

Hopkins, B., 1965, Forest and savanna. An introduction to tropical plant ecology with special reference to West Africa, Heinemann, Ibadan & London.

Huntley, B.J., 1982, Southern African savannas, in B.J. Huntley & B.H. Walker (Eds.), Ecology of tropical savannas, Springer Verlag, Berlin.

ILCA, 1979, Trypanotolerant livestock in West and Central Africa. Volume 2. Country studies, ILCA Monograph no. 2, Addis Ababa, 303 pp.

ILCA, 1987, ILCA annual report 1986/87, ILCA, Addis Ababa.

IEMVT, [1987]a, Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques, Niger, CTA, Wageningen, IEMVT, Maisons-Alfort, 32 pp.

IEMVT, [1987]b, Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques, Mali, CTA, Wageningen, IEMVT, Maisons-Alfort, 33 pp.

IEMVT, [1987]c, Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques, Burkina, CTA, Wageningen, IEMVT, Maisons-Alfort, 28 pp.

INRA, 1978, Alimentation des ruminants, Ed. INRA publications, Versailles, 597 pp.

IWACO, 1983, Etude du bilan d'eau en Haute-Volta. Rapport intermédiaire de la phase préparatoire. Tome II : Inventaire et Synthèse, Ministère du Développement Rural, Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural, Burkina Faso, Ouagadougou.

Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf & H. van Reuler, 1990, A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS), Geoderma 46, 299-318.

Johnson, R.W. & J.C. Tothill, 1985, Definition and broad geographic outline of savanna lands, in J.C. Tothill & J.J. Mott (Eds.), Ecology and management of the world's savannas, Proceedings of the International Savanna Symposium, Brisbane, Australia, May 28-31, 1984, Australian Academy of Science.

Jones, R.J. & R.L. Sandland, 1974, The relation between animal gain and stocking rate, J. agric. Sci. Camb. 83, 335-342.

Jones, M.J. & A. Wild, 1975, Soils of the West African Savanna, Commonwealth Agricultural Bureaux no. 55, 246 pp.

Kessler, J.J. & H. Breman, 1991, The potential of agroforestry to increase primary production in the

Sahelian and Sudanian zones of West Africa, Agroforestry Systems 13, 41-62.

Kessler, J.J. & H. Breman, 1991, Le rôle agro-sylvo-pastoral de la strate ligneuse au Sahel, Club du Sahel/CABO (en prép.)

Keulen, H. van, 1975, Simulation of water use and herbage growth in arid regions, Simulation Monograph Series, Pudoc, Wageningen, 176 pp.

Keulen H. van, 1986, Plant data, in H. v. Keulen, & J. Wolf (Eds.), Modelling of agricultural production : Weather, soils and crops, Simulation Monographs Series, Pudoc, Wageningen, pp. 235-247.

Keulen, H. van & H. Breman, 1990, Agricultural development in the West-African Sahelian region : a cure against land hunger ? Agriculture, Ecosystems and Environment 32, 177-197.

Keulen, H. van & H.H. van Laar, 1986, The relation between water use and crop production, in H. v. Keulen & J. Wolf (Eds.), Modelling of agricultural production : Weather, soils and crops, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 117-129.

Keulen, H. van & N.G. Seligman, 1987, Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop, Simulation Monographs Series, Pudoc, Wageningen, 310 pp.

Keulen, H. van, N.G. Seligman & R.W. Benjamin, 1981, Simulation of water use and herbage growth in arid regions. A re-evaluation and further development of the model , Agric. Syst. 6, 159-193.

Keulen, H. van, R.W. Benjamin, N.G. Seligman & I. Noy-Meir, 1982, Actual and potential production from semi-arid grasslands - Phase II (APPSAG II). Final techn. report and annotated bibliography, ARO, CABO, HU, TPE

Keulen, H. van, H. Breman, J.J. van der Lek, J.W. Menke, L. Stroosnijder & P.W.J. Uithol, 1986, Prediction of actual primary production under nitrogen limitation, Proceedings of the ILCA/ARO/ CABO workshop Modelling of extensive livestock production systems, Bet Dagan, February 5-9 1985, IlCA, Addis Ababa, pp. 42-79.

Klaver, J.M.C., 1982, Het natuurlijke milieu in de Sahel, in P.H.J. van de Boorn & M.P. van Dijk (Red.), De Sahel na de grote droogte, Landendocumentatie nr. 2/3, KIT, Amsterdam.

Klein, H.D., 1981, Contribution à l'estimation de la production sur pâturage sahélien au Niger, Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop. 34, 211-220.

Klein, H.D., I. Keita & J.G. Mesnil, 1981, Trois années d'activités agropastorales en République du Niger - 1977 à 1980. Production et valorisation des pâturages sahéliens (ranch d'Ekrafane) et des fourrages irrigués (station de Kirkissoye), IEMVT, Maisons-Alfort, 290 pp.

Kooman, A. & H. Janssen, 1980, De saver-spender theorie getoetst. Onderzoek naar kieming, vestiging en de reaktie op droogte van enkele Sahelweideplanten, CABO, Wageningen.

Larcher, W., 1980, Physiological plant ecology, second, totally revised edition, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.

Leeuw, L.M. de, 1981, Waardering van houtigen als voedselgewas voor het wild in West-Afrika. Verslag van een literatuurstudie, Vakgroep Natuurbeheer, LUW, Wageningen, 100 pp.

Leeuw, P.N. de & J.C. Tothill, 1990, The concept of rangeland carrying capacity in sub-saharan Arica ; myth or reality, ODJ Pastoral Network Paper 29b, London, 29 pp.

Le Houérou, H.N., 1980a, The role of browse in the Sahelian and Sudanian zones, in H.N. Le Houérou, (Ed.), Browse in Africa, The current state of knowledge, Papers presented at the International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, April 8-12, 1980, ILCA, Addis Ababa, pp. 83-100.

Le Houérou, H.N., 1980b, Chemical composition and nutritive value of browse in tropical West Africa, in H.N. Le Houérou, (Ed.), Browse in Africa, The current state of knowledge, Papers presented at the International Symposium on Browse in Africa, Addis Ababa, April 8-12, 1980, ILCA, Addis Ababa, pp. 261-264.

Le Houérou, H.N. & C.H. Hoste, 1977, Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean basin and in the African sahelo-sudanian zone, Journal of Range Management 30, 181-189.

Le Houérou, H.N., R.E. Bingham & W. Skerbek, 1988, Relationship between the variability of annual rainfall and the variability primary production, Journal of Arid Environments 15, 1-31.

Leloup, S. & M. Traoré, 1989, La situation fourragère dans le sud-est du Mali. Une étude agro-écologique, DRSPR - Volet Fonsébougou, Sikasso, KIT, Amsterdam, 94 pp.

Lewis, T. & L.R. Taylor, 1967, Introduction to experimental ecology, Academic Press, London, 401 pp.

Lof, H., 1976, Water use efficiency and competition between arid zone annuals, especially the grasses Phalaris minor and Hordeum murinum, Agricicultural Research Reports (Versl. landbouwk. Onderz.) 853, Pudoc, Wageningen, 109 pp.

Mannetje, L. 't & K.P. Haydock, 1963, The dry-weight-rank method for the botanical analysis of pasture, Journal of the British Grassland Society 18, 268-275.

Maydell, H.J. von, 1981, Baum und Straucharten der Sahelzone unter besonderes Berücksichtigung ihrer Nutzungsmöglichkeiten. Ergebnisse der Projektbegleitenden Forschung, Technische Zusammenarbeit Bundesrepublik Deutschland - Republik Obervolta, Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) GMBH Eschborn/TS.

McGown, R.L., P. Gillard, L. Winks & W.T. Williams, 1984, The climatic potential for beef cattle production in tropical Australia. Part II. Liveweight change in relation to agroclimatic variables, Agr. Syst. 7, 1-10.

McNaughton, S.J., 1985, Ecology of a grazing ecosystem : the Serengeti, Ecological Monographs 55, 259-294.

Meer, H.G. van der & M.G. van Uum-van Lohuyzen, 1986, The relationships between inputs and outputs of nitrogen in intensive grassland systems, in H.G. van der Meer & G.C. Ennik (Eds.), Nitrogen fluxes in intensive grassland systems, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 1-18.

Mesnil, J.G., 1978, Valorisation de différents types et niveau d'alimentation par les veaux Azawak, in R. Dumas & J. Coulomb, Les possibilités de la production de viande en Afrique tropicale, Tome II : Annexes et bibliographie, IEMVT, Maisons-Alfort, pp. 63-65.

Minson, D.J., 1982, Effect of chemical composition on feed digestibility and metabolizable energy, Nutr. Abstracts and Reviews, Series B, 52, 591-615.

Mohren, G.M.J., 1987, Simulation of forest growth, applied to Douglas fir stands in the Netherlands, thesis, State Agricultural University Wageningen, 184 pp.

Montgomery, D.C. & E.A. Peck, 1982, Introduction to linear regression analysis, John Wiley & Sons, New York, 504 pp.

Niamir, M., 1987, Grazing intensity and ecological change in eastern Senegal : Implications for the management of Sahelian rangelands, thesis Univ. of Michigan, Michigan.

Nix, H.A., 1983, Methods for coping with variation in climate and soils, in proceedings Agro-research for Australia's semi-arid tropics, a symposium on the role of research in agricultural development, CSIRO symposium, Darwin, N.T., Australia, 21-25 march, 1983.

Noy-Meir, I., 1971, Multivariate analysis of the semi-arid vegetation in South Eastern Australia : Nodal ordination bij component analysis, in H.A. Nix (Ed), Quantifying Ecology, Proceedings of the Ecological Society of Australia, Vol. 6.

Odell, R.T., J.C. Dijkerman, W. van Vuure, S.W. Melsted, A.H. Beavers, P.M. Sutton, L.T. Kurtz & R. Miedema, 1974, Characteristics, classification and adaptation of soils in selected areas in Sierra Leone,

West Africa, Bull. 748, Agr. Exp. Sta., University of Illinois, Bull. 4, Njala University College, University of Sierra Leone.

Otchere, E.O., 1984, Traditional cattle production in the subhumid zone of Nigeria, Paper presented at the ILCA/NAPRI Symposium on livestock production in the subhumid zone of Nigeria, Kaduna, Nigeria, 30 Oct. - 2 Nov. 1984, 24pp.

Palausi, G., 1959, Notice explicative sur la feuille Mopti-Ouest (ND30-NO-O64). Carte géologique de reconnaissance á l'échelle du 1 : 500.000, Grande Imprimerie Africaine, Dakar.

Papadakis, J., 1975, Climates of the world and their potentialities, Libro de Edicion Argentina, Buenos Aires.

Penman, H.L., 1948, Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proceedings of the Royal Society of London, series A193, pp. 120-146.

Penman, H.L., 1956, Evaporation : An introductory survey, Neth. J. agric. Sci. 4, 9-29.

Penman, H.L., 1963, Vegetation and Hydrology, Techn. Comm. 53, Comm. Bur. of Soils, Harpenden.

Penning de Vries, F.W.T., 1974, Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants, Neth. J. agric. Sci. 22, 40-44.

Penning de Vries, F.W.T., 1975, The costs of maintenance processes in plant cells, Ann. Bot. 39, 77-92.

Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitèye (Eds.), 1982, La productivité des pâturages sahéliens, une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle, Agric. Res. Rep. 918, Pudoc, Wageningen, 525 pp.

Penning de Vries, F.W.T., J.M. Witlage & D. Kremer, 1979, Rates of respiration and of increase in structural dry matter in young wheat, ryegrass and maize plants in relation to temperature, to water stress and to their sugar content, Ann. Bot. 44, 595-609.

Pichot, J., M.P. Sedogo, J.F. Poulain & J. Arrivets, 1981, Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérales et organiques, Agron. trop. 36, 122-133.

Piot, J., 1969, Végétaux ligneux et pâturages des savanes de l'Adamaoua au Cameroun, Revue Elev. Méd. vét. Pays Trop. 22, 541-559.

Piot, J., J.P. Nebout, R. Nanot & B. Toutain, 1980, Utilisation des ligneux sahéliens par les herbivores domestiques. Etude quantitative dans la zone sud de la Mare d'Oursi (Haute-Volta), CTFT, Nogent sur

Marne, 216 pp.

Poissonet P. & J. Poissonet, 1969, Essai de comparaison de méthodes d'analyses phytosociologiques et agronomiques des formations herbacées denses permanentes, Doc. 120, CEPE, Montpellier, 120 pp.

Poissonet, J., F. Chambris & I. Touré, 1989, Equilibre et déséquilibre des phytocénoses herbacées sahéliennes, in M. Grouzis, E. Le Floc'he, J.C. Bille & A. Cornet (Eds), L'aridité : une contrainte au développement, Caractérisation, Réponses biologiques, Stratégies des sociétés, (sous presse).

Puech, C. & D. Chabi-Gonni, 1984, Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale, série hydrologie, CIEH, Ouagadougou, 91 pp.

Raghavendra, A.S. & V.S.R. Das, 1978, The occurrence of C4-photosynthesis : A supplementary list of C4 plants reported during late 1974 - mid 1977, Photosynthetica 12, 200-208.

Reinink, K., I. Jorritsma & A. Darwinkel, 1986, Adaptation of the AFRC wheat phenology model for Dutch conditions, Neth. J. agric. Sci. 34, 1-13.

Richard, D., 1983, Programme ABT (Juillet 1979 - Décembre 1982). Eléments du rapport + rapport annuel sur les recherches de physiologie (Dakar-Hann) + Problèmes alimentaires saisonniers aux niveau des élevages extensifs (Sénégal), ISRA, Dakar.

Ridder, N. de, 1979, Fotoperiodiciteit in de Sahel. Een zaaitijdenproef met ruim 20 in de Sahel voorkomende plantesoorten en een model voor de berekening van de bloeidatum van deze soorten, PPS, CABO, Wageningen.

Ridder, N. de, N.G. Seligman & H. van Keulen, 1981, Analysis of environmental and species effects on the magnitude of biomass investment in the reproductive effort of annual pasture plants, Oecologia (Berl.) 49, 263-271.

Ridder, N. de, L. Stroosnijder & A.M. Cissé, 1982, La productivité des pâturages sahéliens. Textes du Cours PPS : Tome 1, théorie, Univ. agronomique, Wageningen, 237 pp.

Rietveld, J.J, 1978, Soil non wettability and its relevance as a contributing factor to surface runoff on sandy dune soils in Mali, Report PPS, Dept. d'Ecologie theorique, Univ. agronomique, Wageningen, Pays Bas, 179 pp.

Rijtema, P.E., 1965, An analysis of actual evapotranspiration, Agric. Res. Rep. 659, Pudoc, Wageningen, 107 pp.

Ritchie, J.T., 1972, Model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover, Water Res. Res. 8, 1208-1213.

Rivière, R., 1978, Manuel d'alimentation des ruminants domestiques en milieu tropical, Manuels et précis d'élevage 9, IEMVT, Maisons-Alfort, 527 pp.

Robertson, G.W., 1983, Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops, WMO Techn. Note No. 180, WMO, Geneva, 99 pp.

Robinson, J.B.D., 1957, The critical relationship between soil moisture content in the region of the wilting point and mineralization of native soil nitrogen, J. agric. Sci. 49, 100-105.

Rodier, J. & C. Aurrey, 1965, Estimation of discharge of 10 year floods for catchments <220 sq miles in W. Africa, Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH)/ORSTOM, Ouagadougou.

Roux, G. & M. Roux, 1967, A propos de quelques méthodes de classification et Phytosociologie, Rev. Statist. appl. 15, 59-72.

Satter, L.D. & R.E. Roffler, 1981, Influence of nitrogen and carbohydrate inputs on rumen fermentation, in W. Haresign & D.J.A. Cole (Eds.), Recent developments in ruminant nutrition, Buuterworths, London, pp. 115-139.

Seginer, I. & Y. Morin, 1970, A model of surface crusting and infiltration in bare soils, Water Res. Res. 6, 629-633.

Siband, P., 1972, Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance, Agron. trop. 27, 574-591.

Sidibé, M., 1976, Contribution à l'étude comparative de quelques modes de traitements appliqués sur les pâturages naturels du C.N.R.Z. de Sotuba, Mémoire de DEA, CPS/ENSup., Bamako,

Slatyer, R.O., 1968, Plant-water relationships, Academic Press, London, 366 pp.

Snijders, H., 1982, Ruissellement en rapport avec des propriétés du sol, la grandeur des pluies et la localisation géographique, in H. Breman (Ed.), La capacité de charge des pâturages sahéliens pour les systèmes d'élevage de la région, Compte-rendu de la table ronde, CABO, Wageningen, pp. 18-30.

Soest, P.J. van, 1982, Nutritional ecology of the ruminant, Corvallis, O & O Books, 374 pp.

Spitters, C.J.T. & R. Aerts, 1983, Simulation of competition for light and water in crop-weed associations Aspects of Applied Biology 4, 467-483.

Stachauki, A. & J.R. Zimka, 1976, Methods of studying forest ecosystems : leaf area, leaf production

and withdrawal of nutrients from leaves of trees, Ecol. Pol. 23, 637-648.

Stanford, G. & E. Epstein, 1974, Nitrogen mineralization-water relations in soils, SSSA Proc. 38, 103-107.

Stoddart, L.A., A.D. Smith & T.W. Box, 1975, Range management, McGraw-Hill series in Forest Resources, McGraw-Hill, New York.

Storm, E., E.R. Orskov & R. Smart, 1983, The nutritive value of rumen micro-organisms in ruminants. 2. The apparent digestibility and net utilization of microbial N for growing lambs, Brit. J. Nutr. 50, 471-478.

Stroosnijder, L., 1982, Simulation of the soil water balance, in F.W.T. Penning de Vries & H.H. van Laar (Eds), Simulation of plant growth and crop production, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 175-193.

Stroosnijder, L. & W.B. Hoogmoed, 1984, Crust formation on sandy soils in the Sahel. II. Tillage and its effect on the water balance, Soil and Tillage Research 4, 321-337.

Swift, J. (Ed.), 1984, Pastoral development in central Niger : Report of the Niger Range and Livestock Project, MDR, Niamey. 830 pp.

Tacher, G., 1975a, Notes sur la démographie bovine au Sahel. I. Représentation et projection théoriques du troupeau par un modèle mathématique, Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop. 28, 547-569.

Tacher, G., 1975b, Notes sur la démographie bovine au Sahel. II. Représentation et projection théoriques du troupeau par un modèle mathématique après une catastrophe, Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop. 28, 571-595.

Tamboura, T., B. Bibe, R. Babile & J.P. Petit, 1982, Résultats expérimentaux sur le croisement entre races locales et races laitières améliorées au Mali, Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop. 35, 401-412.

Togola, M., M.I. Cissé & H. Breman, 1975, Evolution de la végétation du ranch de Niono depuis 1969, in Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux Africains, Actes du colloque, Bamako-Mali, 3-8 mars 1975, ILCA, Addis Abeba, pp. 195-201.

Tolsma, D.J., 1989, On the ecology of savanna ecosystems in south-eastern Botswana, thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.

Toutain, B. & P. Lhoste, 1978, Essai d'estimation du coefficient d'utilisation de la biomasse herbacée par le bétail dans un périmètre sahélien, Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop. 31, 95-101.

Traoré, G., 1978, Evolution de la disponibilité et de la qualité de fourrage au cours de la transhumance de Diafarabé, thèse, Centre Pédagogique Supérieur, Bamako.

Traoré, M. & Y. Monnier, 1980, Atlas du Mali, Les Atlas Afrique, Editions Jeune Afrique, Paris, 64 pp.

Troelsen, J.E. & J.B. Campbell, 1969, The effect of maturity and leafiness on the intake and digestibility of alfalfas and grasses fed to sheep, J. agric. Sci. 73, 145-154.

Underwood, E.J., 1981, The mineral nutrition of livestock, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, 177 pp.

Vachaud, G., C. Dancette, S. Sonko & J.L. Thony, 1978, Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non-saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique, Ann. agron. 29, 1-36.

Veen, J.A. van, 1977, The behaviour of nitrogen in soil. A computer simulation model, thesis, ITAL-Wageningen, 164 pp.

Veihmeier, F.J. & A.H. Hendrickson, 1949, Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils, Soil Sci. 68, 75-94.

Veihmeyer, F.J. & A.H. Hendrickson, 1955, Does transpiration decrease as the soil moisture decreases ? Trans. Am. Geoph. Union 36, 425-428.

Wagenaar, K.T., A. Diallo & A.R. Sayers, 1986, Productivity of transhumant Fulani cattle in the inner Niger delta of Mali, ILCA research report No. 13, ILCA, Addis Ababa, 57 pp.

Walker, B.H., 1985, Structure and function of savannas. An overview, in J.C. Tothill & J.J. Mott (Eds.), Ecology and management of the world's savannas, Proceedings od the International Savanna Symposium, Brisbane, Australia, May 28-31, 1984, Australian Academy of Science.

Walker, B.H., R.H. Emslie, R.N. Owen-Smith & R.J. Scholes, 1987, To cull or not to cull : lessons from a southern African drought, J. applied Ecology 24, 381-401.

Walter, H., 1986, The Namib desert, in M. Evenari, I. Noy-Meir & D.W. Goodall (Eds.), Ecosystems of the world 12 B, Hot deserts and arid shrublands, Elsevier, Amsterdam, pp. 245-282.

Ward, H.K., 1978, Indigenous cattle research. A review, Rhodesia agric. J. 75, 45-54.

Watson, D.J., 1947, Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years, Ann. Bot.

11, 41-76.

Weir, A.H., P. Laggs, J.R.Porter & J.H.Rayner, 1984, A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations, J. agric. Sci. (Camb.) 102, 371-382.

Westoby, M., 1980, Elements of a theory of vegetation dynamics in arid rangelands, Isr. J. Bot. 28, 169-194.

Wheat, J.D. & J. Broadhurst, 1968, An analysis of data on Bunaji cattle at Birnin Kudu and Kabomo, Northern Nigeria, Samaru Miscellaneous Paper no. 25, Institute for Agricultural Research, Samaru Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 13 pp.

Wheat, J.D., P.N. de Leeuw & B.A. Koch, 1972, Bunaji cattle at the Shika Research Station, North Central State, Nigeria, Samaru Miscellaneous Paper no. 41, Institute for Agricultural Research, Samaru Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 12 pp.

Wijngaarden, W. van, 1988, Analyse globale des systèmes de production dans les départements Maradi - Zinder - Diffa, Programme Intégré de Gestion des Ressources Animales et Rurales (PIGRAR), CABO, Wageningen, 40 pp.

Willigen, P. de & M. van Noordwijk, 1987, Roots, plant production and nutrient use efficiency, thesis Agric, Univ. Wageningen, 282 pp.

Wilson, R.T., 1983, L'élevage au Mali central : premiers aperçus sur la productivité des bovins dans le système agro-pastoral, document de programme no. 90A, CIPEA, Bamako, 15 pp.

Wilson, J.R., R.H. Brown & W.R. Windham, 1983, Influence of leaf anatomy on the dry matter digestibility of C3, C4 en C3/C4 intermediate types of Panicum species, Crop Science 23, 141-146.

Winter W.H., T.H. McCosker, D. Pratchett & J.D.A. Austin, 1985, Intensification of beef production, in R.C. Muchow (Ed.), Agro-research for the semi-arid tropics, North-West Australia, University of Queensland Press, St. Lucia, pp. 395-418.

Wit, C.T. de, 1958, Transpiration and crop yields, Agricultural Research Reports 64.8, Pudoc, Wageningen, 88 pp.

Wit, C.T. de, 1970, Dynamic concepts in biology, in Prediction and measurement of photosynthetic productivity, Proc. IBP/PP Technical Meeting Trebon, Pudoc, Wageningen.

Wit, C.T. de & J. Goudriaan, 1978, Simulation of ecological processes, Simulation Monograph Series, Pudoc, Wageningen, 175 pp.

Wit, C.T. de & H. van Keulen, 1972, Simulation of transport processes in soils, Simulation Monographs Series, Pudoc, Wageningen, 100 pp.

Zemmelink, G., 1986, Measuring intake of tropical forages, in C.C. Balch & A.J.H. van Es (Eds), Recent advances in feed evaluation and rationing systems for dairy cattle in extensive and intensive production systems, International Dairy Federation Bulletin 196, 17-21.

Zonneveld, I.S., 1989a, The land unit. A fundamental concept in landscape ecology, and its applications, Landscape Ecology 3, 67-86.

Zonneveld, I.S., 1989b, Landscape survey and evaluation, Journal of Arid Environments 17, 255-264.

Zonneveld, I.S., H.A.M.J. van Gils & D.C.P. Thalen, 1979, Aspects of the ITC approach to vegetation survey, Documents phytosociologiques N.S. Vol. IV, pp. 1029-1064.

Annexe

Equations courantes

(voir IV.4 pour les symboles et les abréviations, ainsi que pour leurs unités)

1. Pâturages

1.1. Disponibilité en eau

infiltration et répartition

quantité d'eau infiltrée (mm/an; équation II.1)

$$I = P \times (1 - R)$$

quantité d'eau infiltrée sur partie d'une unité de paysage, où l'eau s'infiltre de façon homogène (mm/an; équation II.12)

$$I_{ho} = P$$

quantité d'eau infiltrée sur partie d'une unité de paysage, où l'eau ruisselle (mm/an; équation II.13)

$$I_{ru} = P \times (1 - R)$$

quantité d'eau infiltrée sur partie d'une unité de paysage (dépressions), où il y a concentration des écoulements (mm/an; équation II.14)

$$I_{dé} = (SUR_{ru}/SUR_{dé}) \times (P \times R) + P$$

comparable au cas précédent, mais correction pour perte en dehors de l'unité (mm/an; équation II.14a)

$$Id_{é} = (SUR_{ru}/SUR_{dé}) \times (P \times R) + P - (1/SUR_{dé}) \times (P \times K_r)$$

humidification du sol

taux d'humidité du sol à pF2,5 (cm/cm³; équation II.5)

$$H = 0{,}014\ (37 - 0{,}35\ TS)$$

profondeur d'humidification (cm; pour $I > 69$ mm; équation II.6)

$$pr_h = a \times (I - 69)/1{,}15$$

quantité d'eau perdue par percolation (mm/an; équation II.4)

$$Pe = 0{,}69\ I - 45\ H - 0{,}22\ pr - 7{,}8\ (H \times pr) - 74$$

comparable au cas précédant, mais pour une profondeur fixe du sol (mm/an; pour sol à enracinement jusqu'à 200 cm; équation III.6)

$$Pe = 0{,}69\ I - 1605\ H - 118$$

1.2. Disponibilité en azote

estimation théorique

quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée; $I \leq 250$ mm/an (kg/ha; $N_b \leq 10{,}9$ kg/ha; équation II.16)

$$N_b = B \times [N]/1000$$

quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée; I > 250 mm/an (kg/ha; équation II.7)

$$N_b = 0{,}0083\ (I - Pe\ ) / (f - 0{,}13)$$

fraction moyenne d'azote perdue annuellement à partir de la biomasse aérienne de la strate herbacée (voir figure II.4 ; équation III.3)

$$f = f_{é} + f_c + f_v + f_r$$

quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne des espèces ligneuses ainsi que des herbacées; valeur théorique (kg/ha; équation II.2)

$$N_{lh} = 0{,}0083\ I / (f_{lh} - 0{,}13)$$

valeur de f pour les espèces ligneuses et la strate herbacée (équation II.3)

$$f_{lh} = (rc \times f_{li}) + (1 - rc) \times f$$

valeur de f pour les espèces pérennes et les graminées annuelles (équation II.17)

$$f_{pa} = (rc_p \times f_{pé}) + (1 - rc_p) \times f$$

traitement des observations de terrain

valeur intermédiaire de rendement d'azote en cas de standardisation de N_m (kg/ha; équation II.18)

$$N_i = N_m - 10^{-5}\ (L/100\text{-}0{,}05) \times B \times [N]_l \times c$$

N_m après standardisation pour la contribution des légumineuses à la biomasse de la strate herbacée et pour la pluviosité; $I \geq 120$ mm/an (kg/ha; équation II.19)

$$N_s = F_{50}/F_{am} \times N_i$$

comparable au cas précédent; I < 120 mm/an (kg/ha; équation II.20)

$$N_s = N_i + 15\ (F_{50} - F_{am})$$

quantité moyenne maximum d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée pendant une année sèche (p10%; kg/ha; équation II.9)

$$N_{10} = F_{10}/F_{50} \times N_b$$

1.3. Production des pâturages

saison de pluies

biomasse aérienne de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance; $I <$ mm/an (kg/ha; I ≤ 250 mm; équation II.15)

$$B = 7{,}25\ (I\text{-}Pe\ ) - 593$$

comparable au cas précédent; $I \geq$ mm/an (kg/ha; équation II.21)

$$B = 1000\ N_b \text{ (ou } 1000\ N_s) / [N]$$

saison sèche

repousses en saison sèche pour des régions exondées (kg/ha; équation II.10)

$$RE_{pl} = 0{,}064\ B + 100$$

repousses en saison sèche après retrait de l'eau d'inondation (kg/ha; B deg. 5000 kg/ha; équation II.11)

$$RE_{in} = 0{,}21\ B - 650$$

1.4. Aspects qualitatifs

taux d'azote

taux d'azote à la fin de la saison de croissance (g/kg)

voir figure II.3

taux d'azote de la strate herbacée à la fin de la saison sèche (g/kg; équation II.8)

$$[N]_{ss} = 0,44\ [N]_{sp} + 1,27$$

digestibilité

coefficient de digestibilité de la matière organique (%):

pour graminées annuelles (équation III.9)

$$CD_{mo} = 76 - 0,09\ [CB] + 0,7\ [N\ ]$$

pour graminées pérennes (équation III.10)

$$CD_{mo} = 79 - 0,11\ [CB] + 0,6\ [N\ ]$$

pour légumineuses annuelles (équation III.11)

$$CD_{mo} = 96 - 3,4\ [CB] + 5,4\ [N\ ] + 0,03\ [CB]^2 - 0,2\ [N]^2$$

pour autres dicotylédones annuelles (équation III.12)

$$CD_{mo} = 65 - 0,07\ [CB] + 0,6\ [N\ ]$$

2. Bovins

2.1. Ingestion alimentaire

fourrages de qualité moyenne (tableau III.13)

matière sèche ingérée, par rapport du poids métabolique (g/kg^{0,75} par jour; équation III.18)

$$MS_{ing} = (333\ [N] + 940) / CD_{ms}$$

fourrages de qualité diverse

matière sèche ingérée

voir tableau III.15

2.2. changements de poids

fourrages de qualité moyenne (tableau III.13)

gain de poids par animal (kg/jour; pour $[N] \geq 8$ g/kg; équation III.21)

$$GP = (1{,}63\ [N] - 12{,}6) \times 10^{-3}\ PV^{0,75}$$

perte de poids par animal (kg/jour; pour $[N] < 8$ g/kg; équation III.22)

$$PP = (1{,}89\ [N] - 14{,}6) \times 10^{-3}\ PV^{0,75}$$

fourrages de qualité diverse

gain de poids par animal (kg/jour; pour $MD_{ing} > 36$; équation III.19)

$$GP = 49 \times 10^{-5}\ (MD_{ing} - 36) \times PV^{0,75}$$

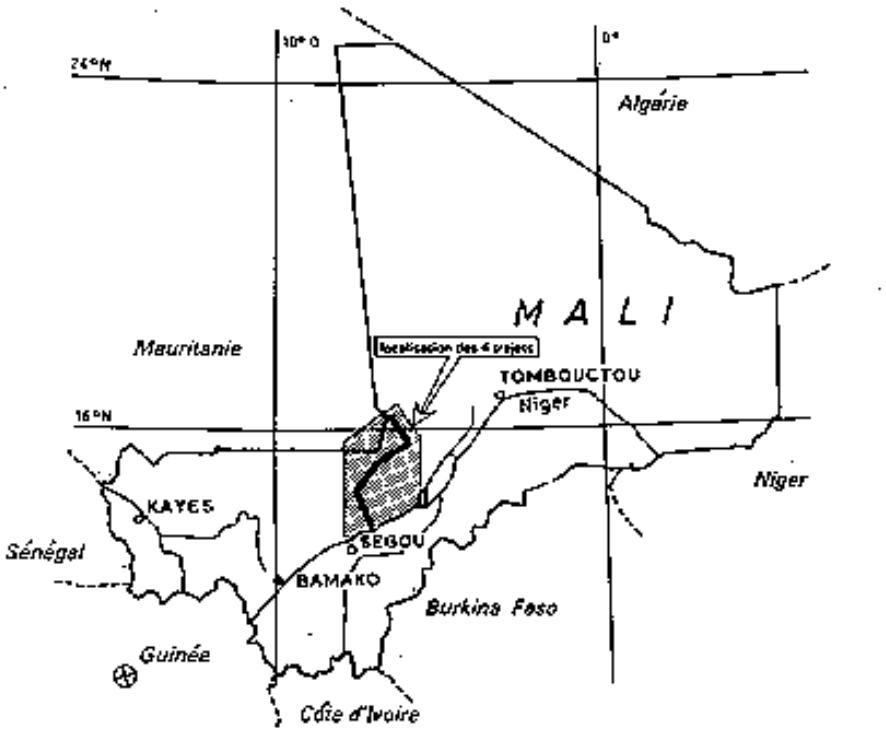
perte de poids par animal (kg/jour ; pour $MD_{ing} < 36$; équation III.20)

$$PP = 58 \times 10^{-5}\ (36 - MD_{ing}) \times PV^{0,75}$$

Carte de paysages semi-détaillée

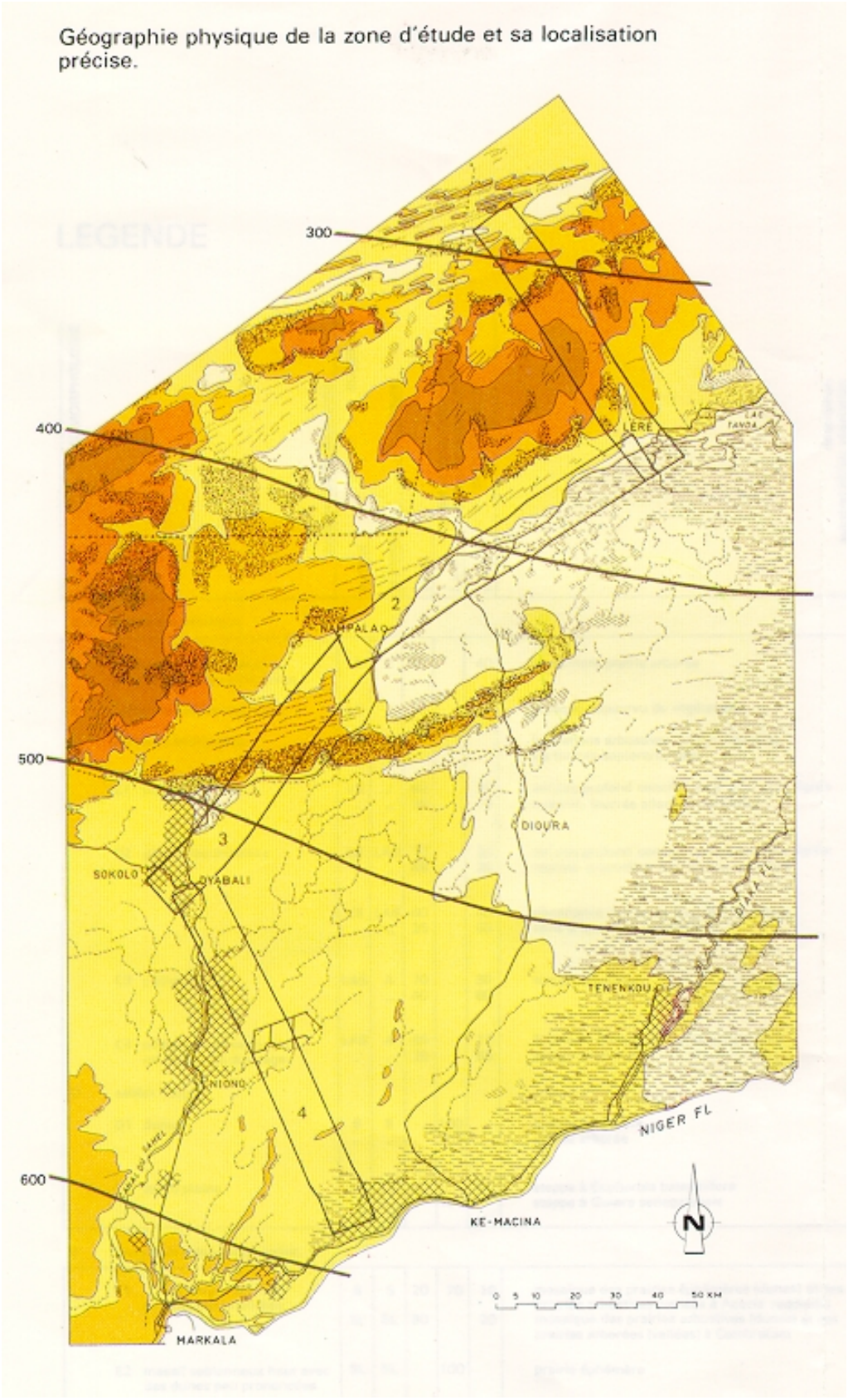
Carte de paysages semi-detaillee (Mali)

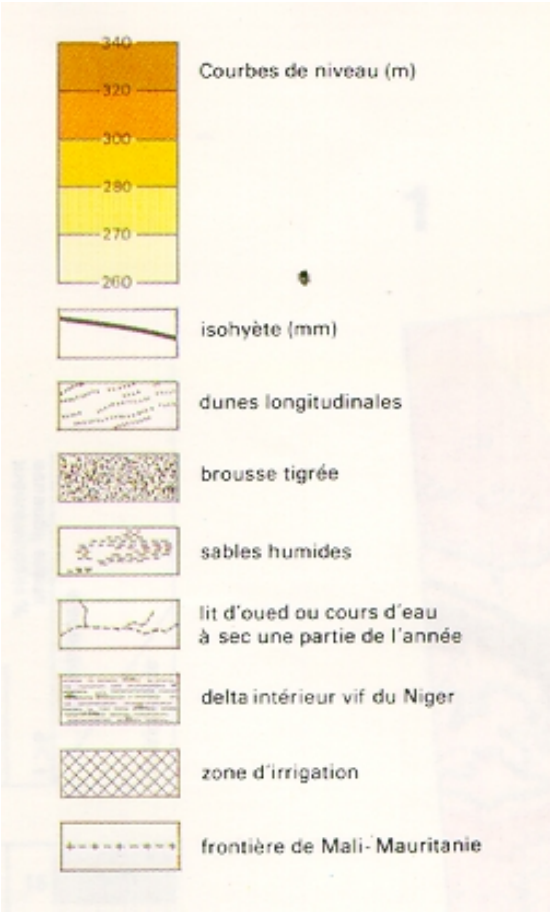
Localisation globale de la zone d'étude.



LEGENDE

Géographie physique de la zone d'étude et sa localisation précise.



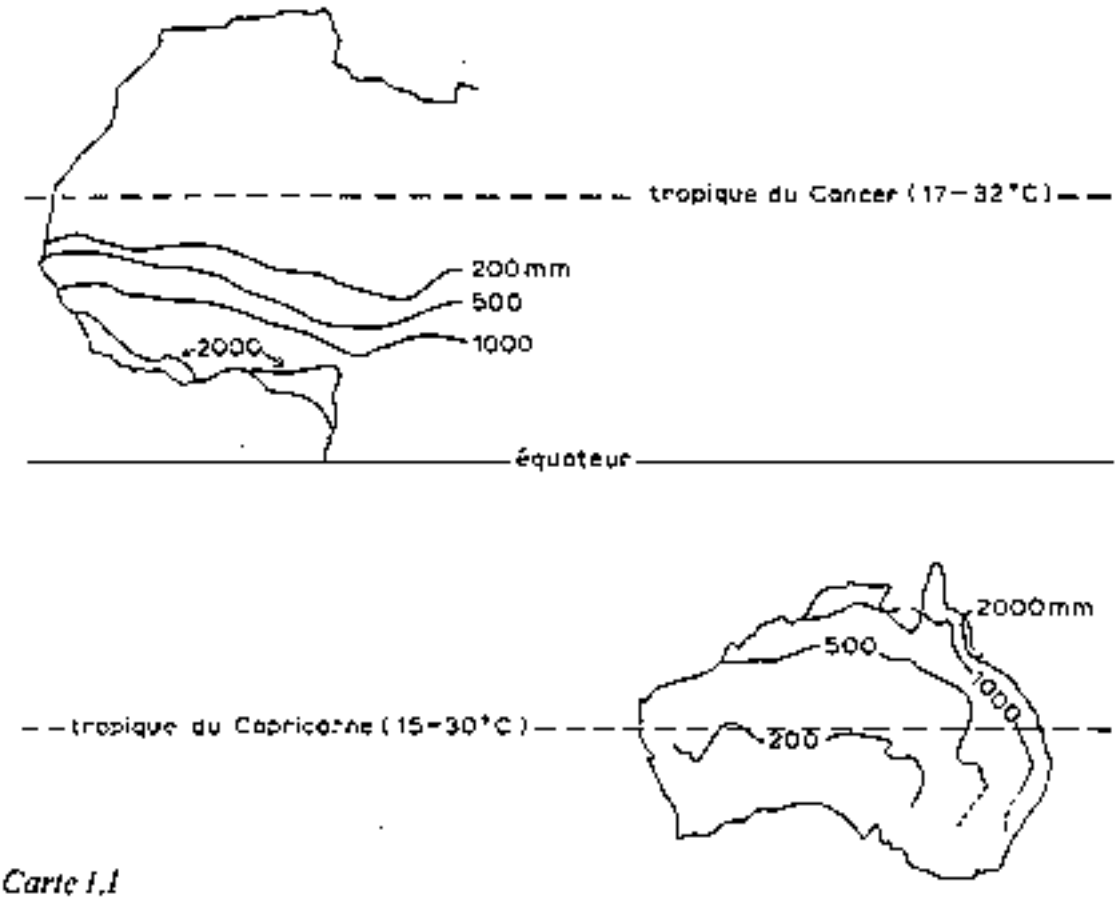


transect 1

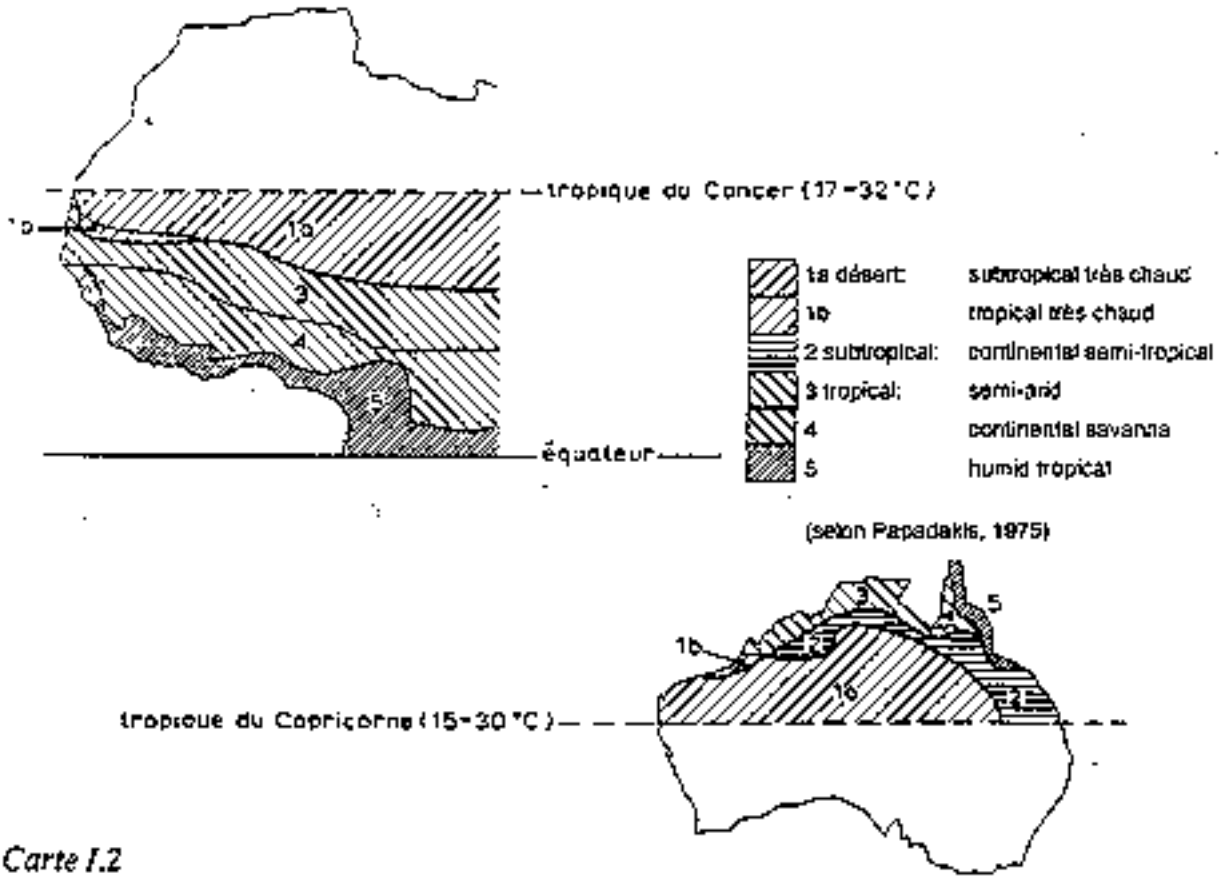
transect 2

transect 3

transect 4



Carte 1.1
Situation des régions arides en Afrique de l'Ouest et en Australie.



Carte I.2
Comparaison des climats du Sahel et de l'Australie.

Selon Papadakis, 1975.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_1.GIF

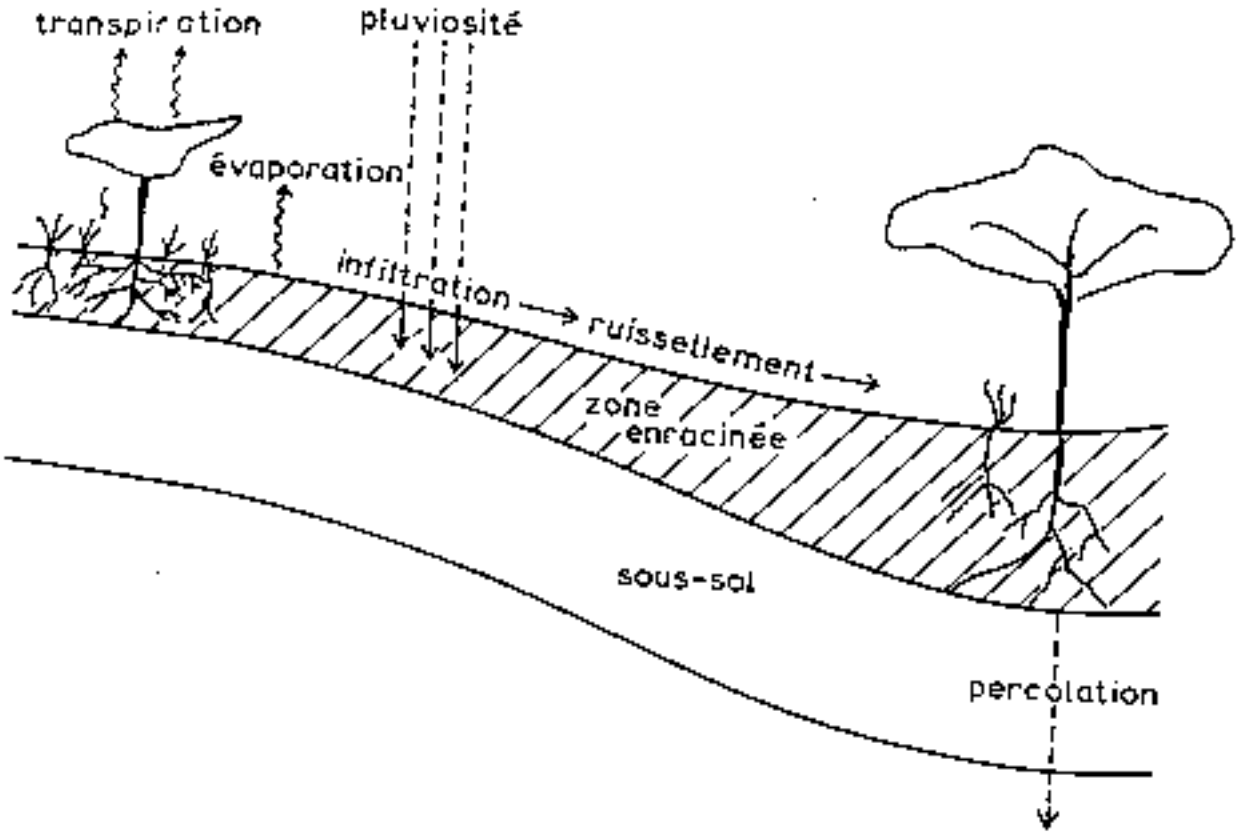
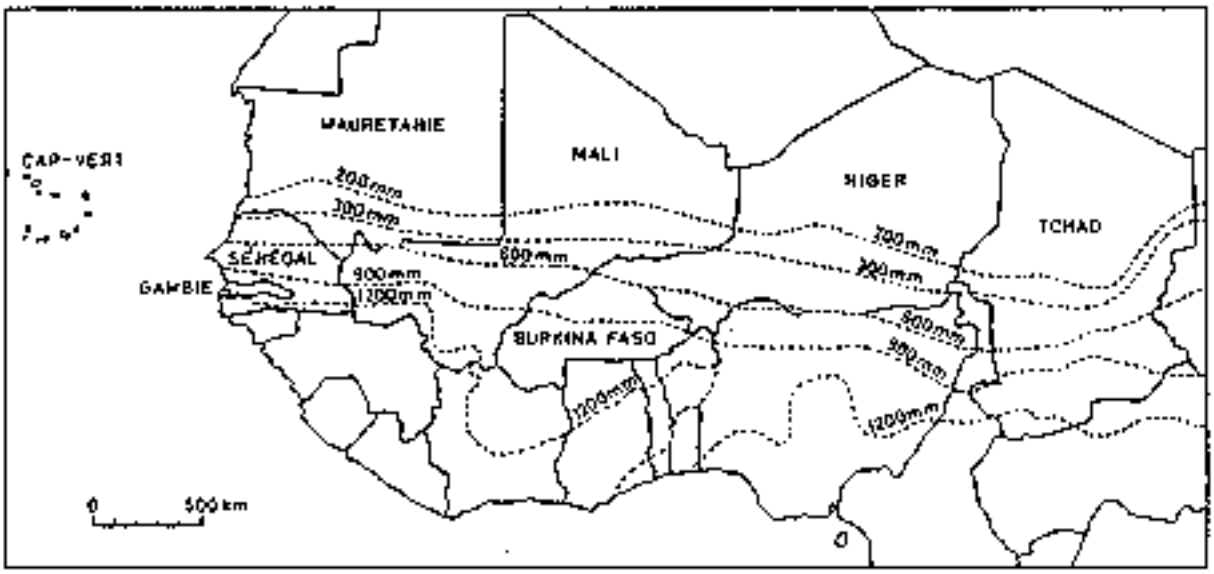


Figure I.1
Bilan hydrique lié aux processus qui influencent la disponibilité en eau pour la croissance des plantes.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_1.GIF26-4-2010 11:22:49



Carte I.3
Pluviosité moyenne annuelle dans les pays sahéliens.

Selon Klaver, 1982.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_2.GIF

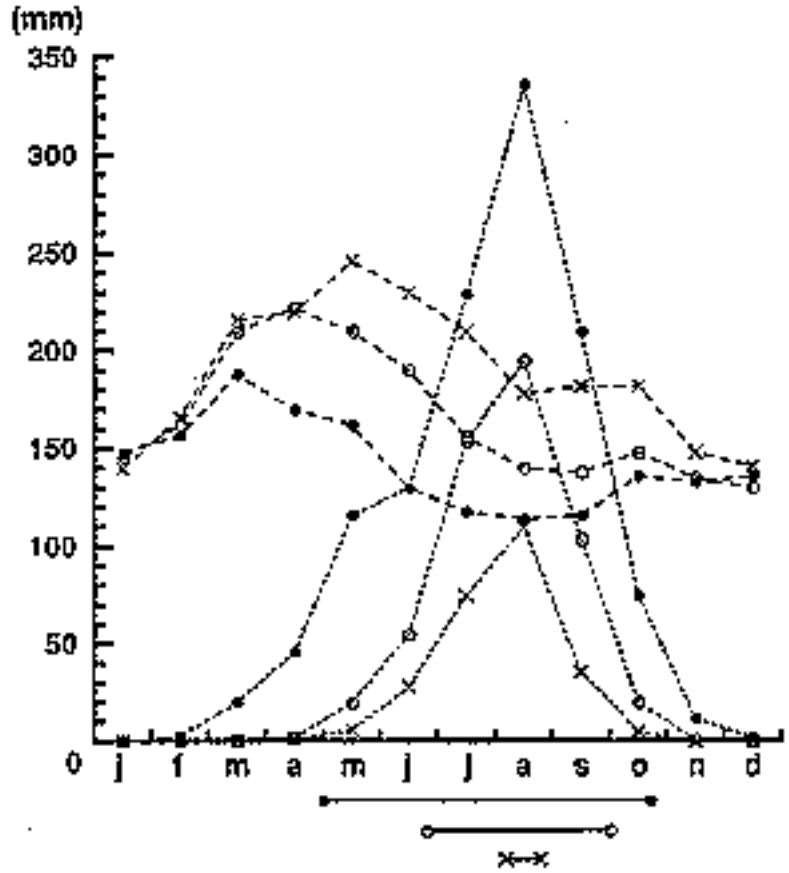


Figure I.2
Evapotranspiration potentielle selon Penman (1948) et distribution de la pluviosité mensuelle pour les stations météorologiques de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), Mopti et Gao (Mali).

×: Gao (261 mm) ; ○ : Mopti (552 mm) ; ● : Bobo Dioulasso (1185 mm) ; - - - : évaporation potentielle ; —— : pluviosité moyenne ; _____ : saison de croissance, définie comme P > 0.5 ETP (selon Boudet, 1978).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_2.GIF26-4-2010 11:22:50

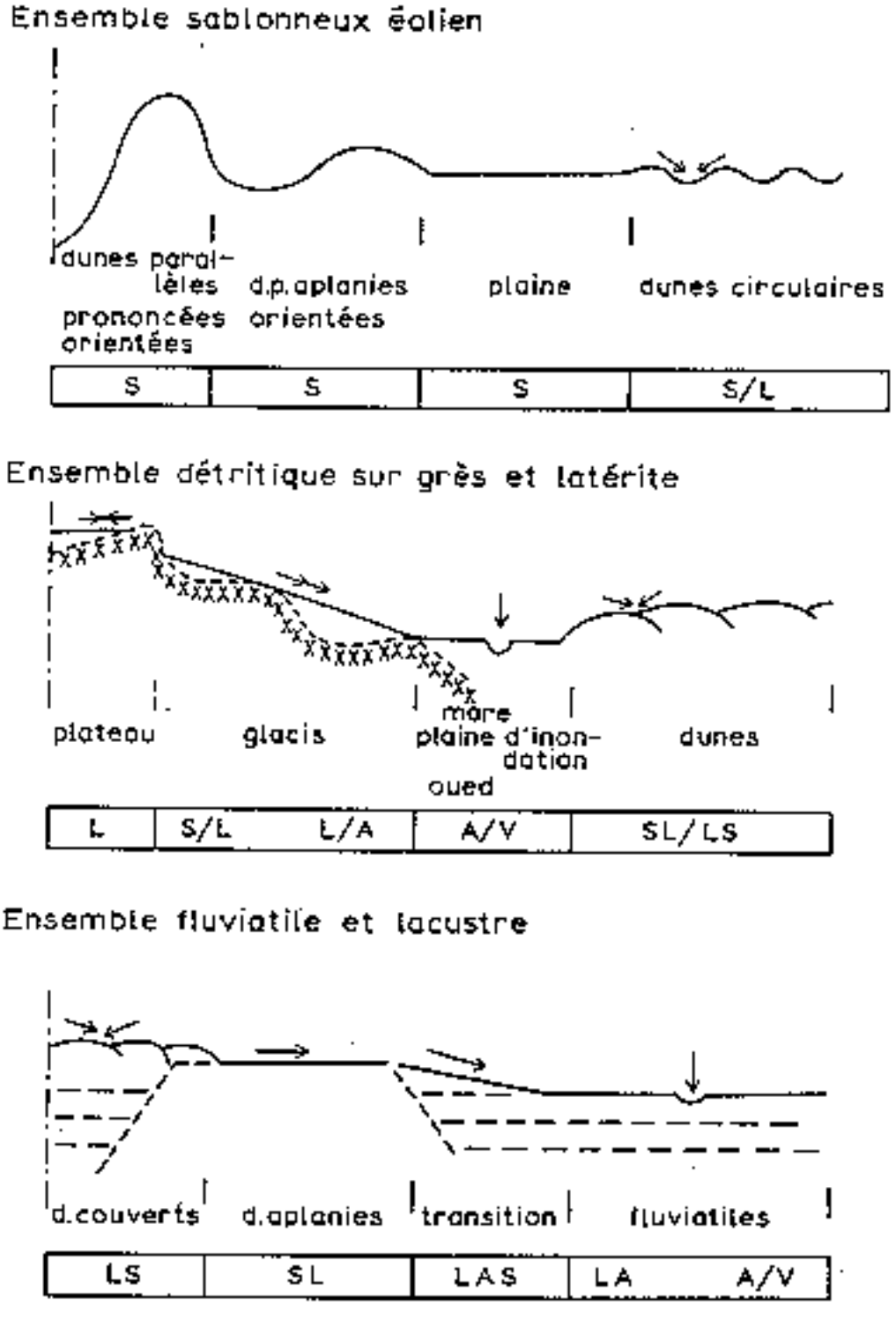


Figure 1.3
Ensembles géomorphologiques principaux de l'Afrique de l'Ouest.

→ sens du ruissellement; roche mère xxx; S = sable, L = limon, A = argile et V = vertique (selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 55).

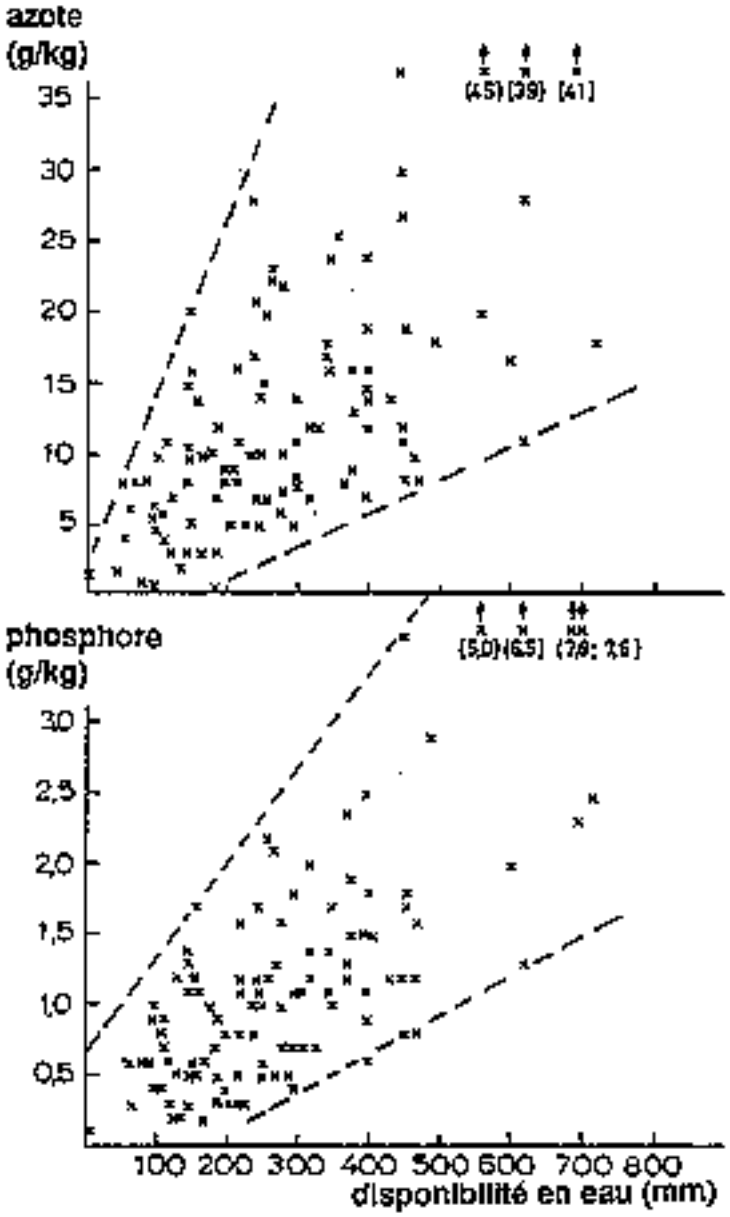


Figure 1.4
Quantités d'azote et de phosphore absorbées par la végétation, en tant que fonction de la croissance de la disponibilité en eau.

Les données ont été rassemblées sur un trajet nord - sud au Mali dans les années 1976-1979 (selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 310).

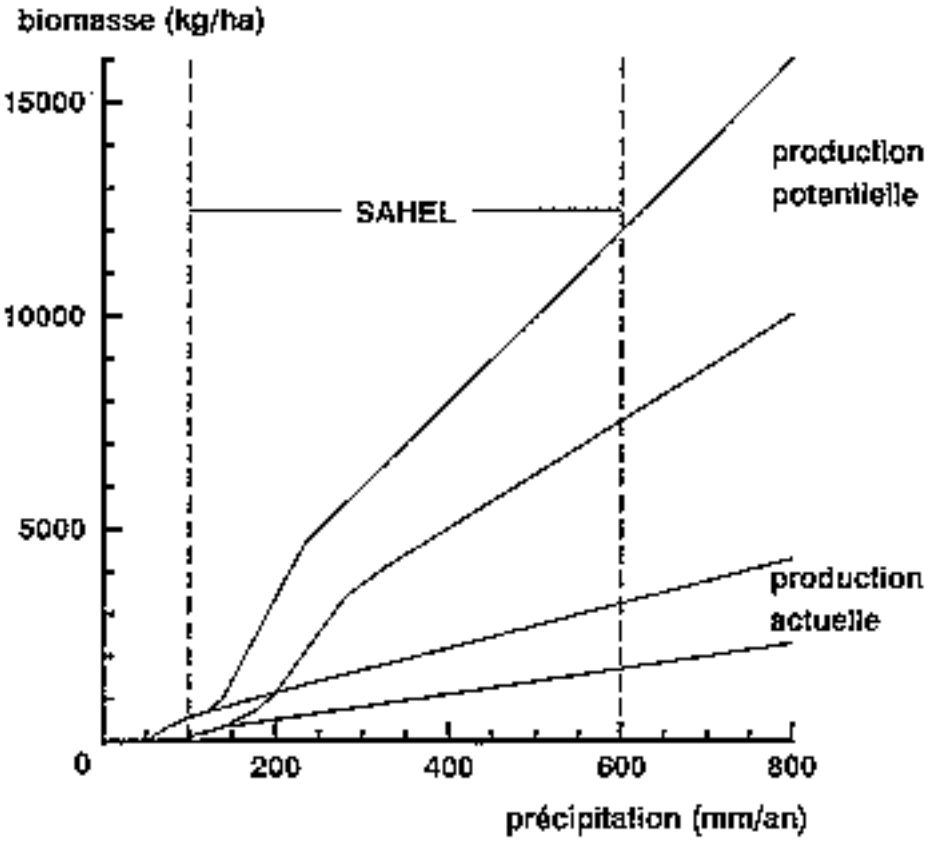


Figure 1.5
Production de la biomasse de la strate herbacée pour une disponibilité naturelle en éléments nutritifs (production actuelle) et pour une disponibilité optimale d'éléments nutritifs (production maximale) avec une pluviosité croissante.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982.

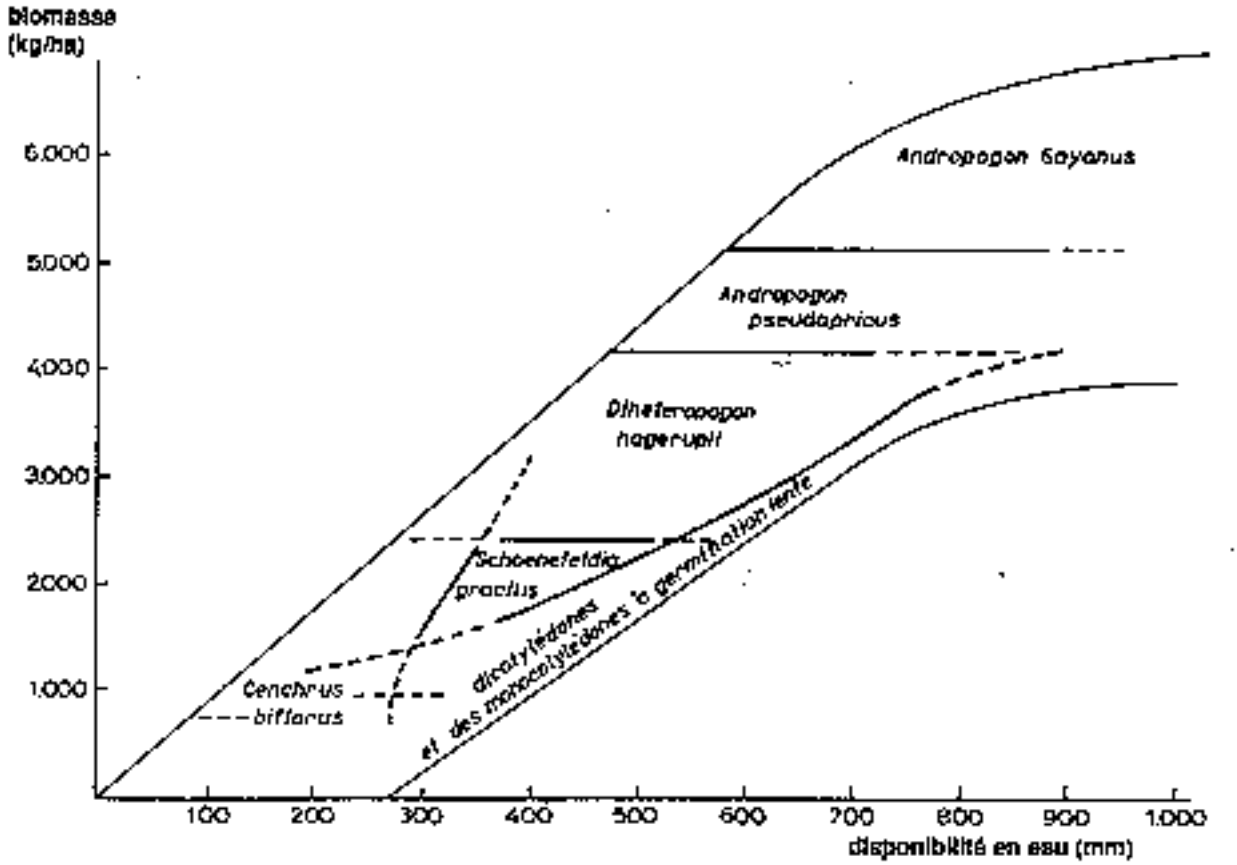


Figure I.6
Influence de la composition de la végétation sur le rapport entre la biomasse et la disponibilité en eau.

Le rapport présenté et les espèces considérées comme dominantes compte tenu de leur part dans la production de la biomasse ont été observés au cours de la période 1976-1979 sur un traject nord-sud au Mali (selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 318).

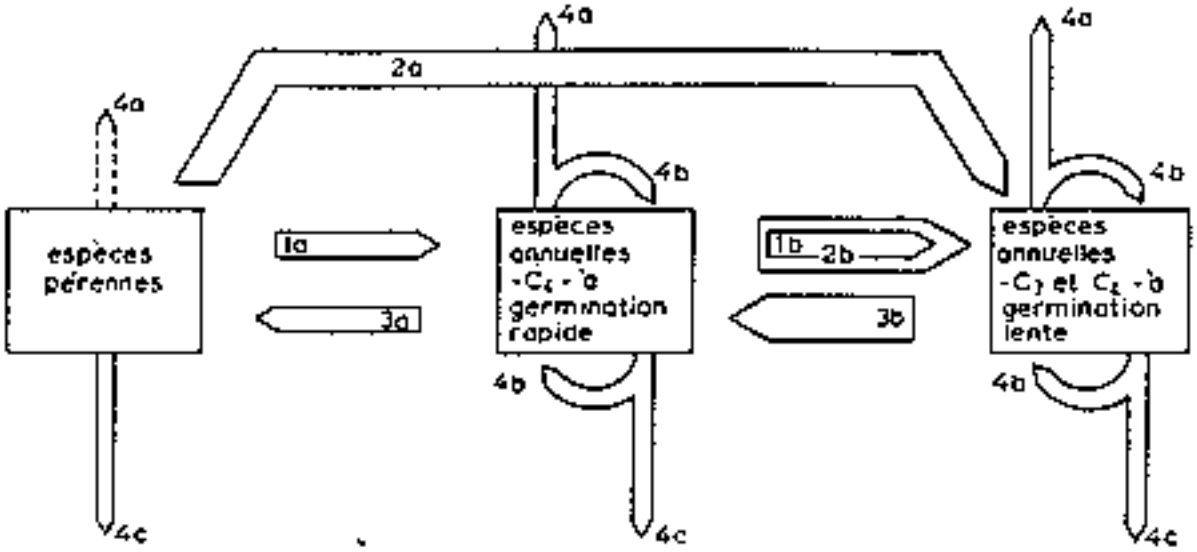


Figure I.7
Dynamique des végétations dans les pays sahéliens, avec les modifications possibles représentées par des flèches.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982, p. 132; pour les explications, se référer au texte.

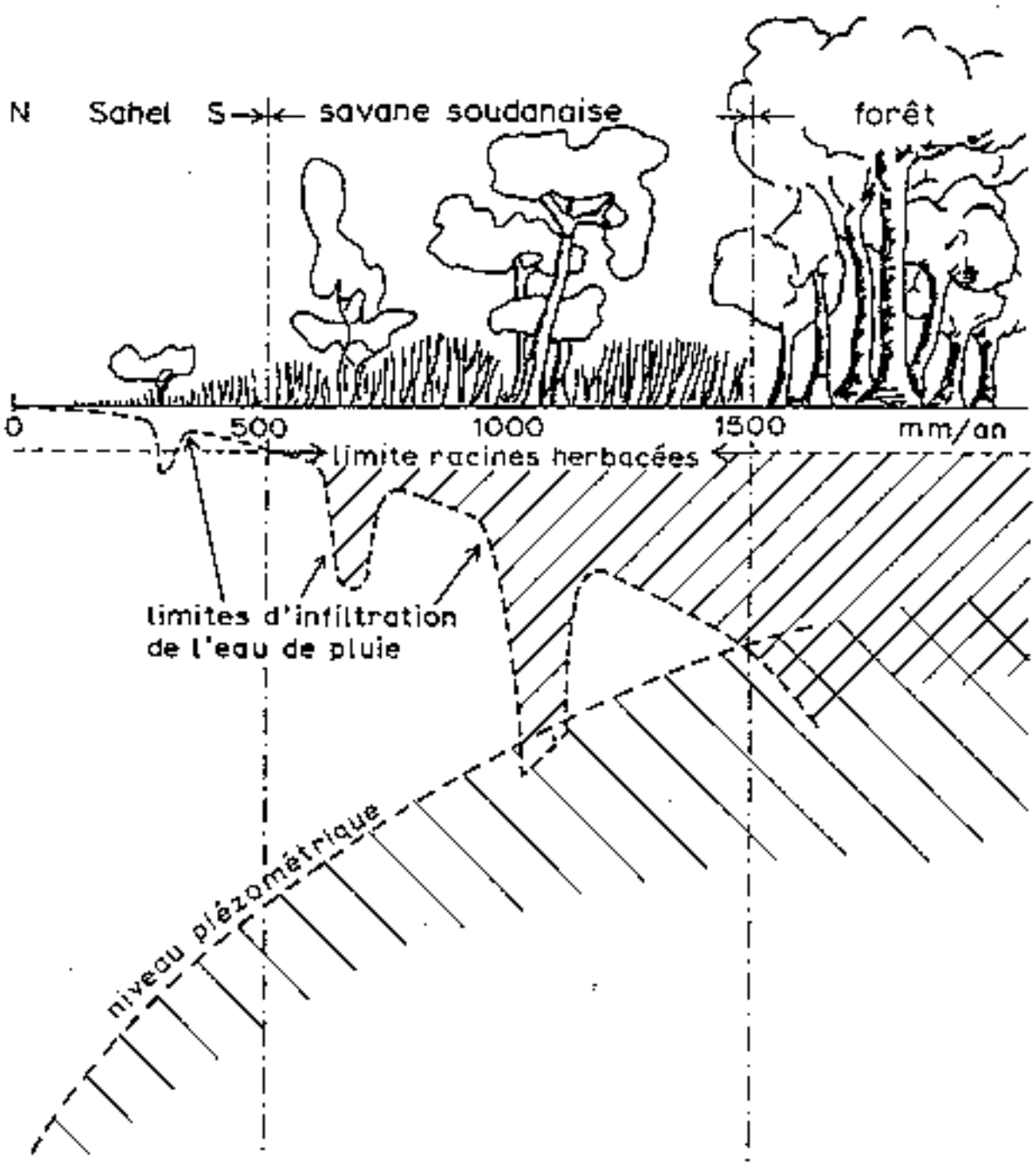


Figure I.8
Importance relative des espèces ligneuses par rapport à la strate herbacée sur les sols profonds sur un trajet nord-sud, par rapport à la disponibilité en eau.

Selon Kessler & Breman, en préparation.

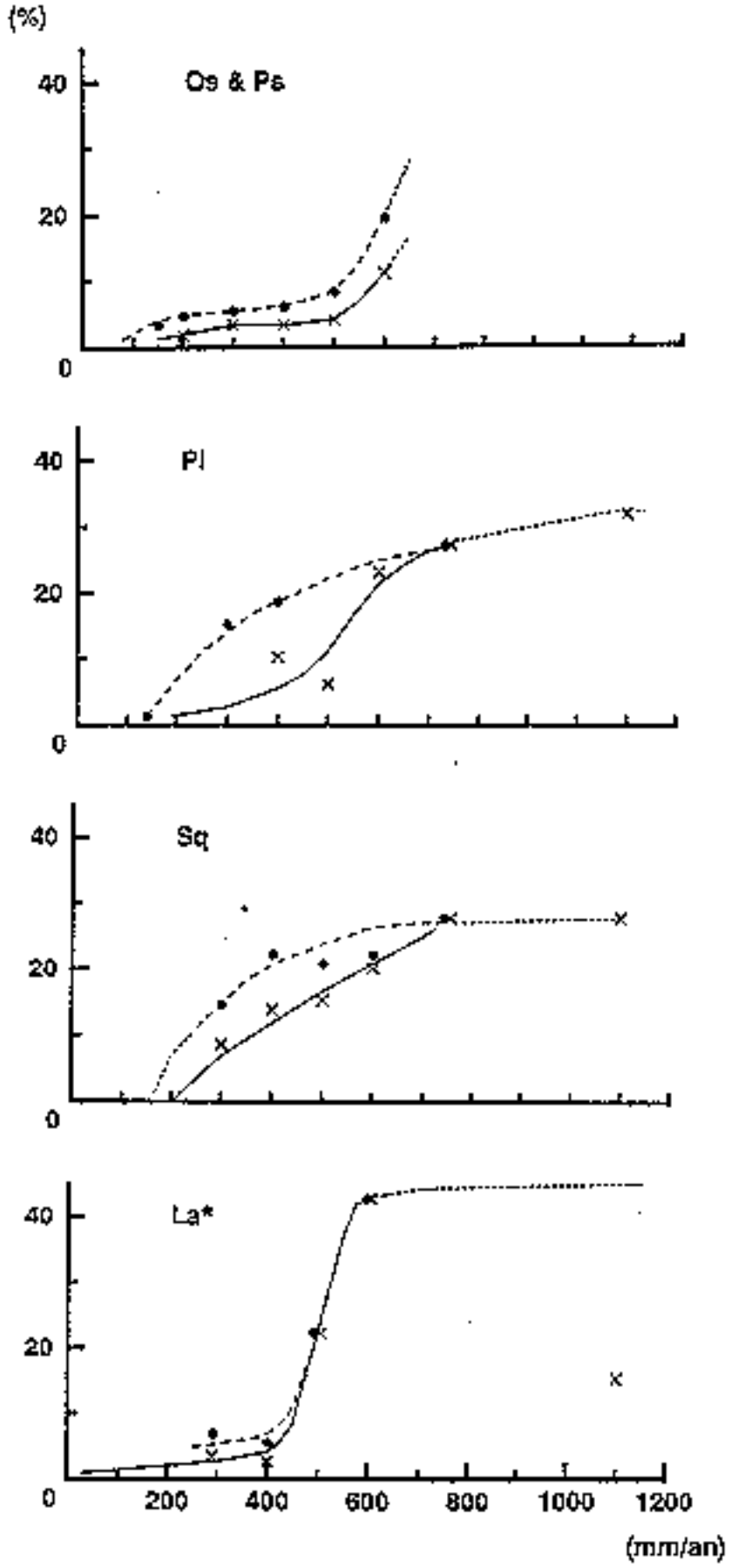


Figure 1.9
Taux de couverture (%) par les espèces ligneuses par rapport au paysage et à la pluviosité annuelle moyenne, avant et après la sécheresse dans les années '70.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_9.GIF

annuelle moyenne, avant et après la sécheresse dans les années '70.

* recouvrement bien plus bas en cas d'inondations de longue durée (selon Kessler & Breman, en préparation).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_9.GIF (2 of 2)26-4-2010 11:22:52

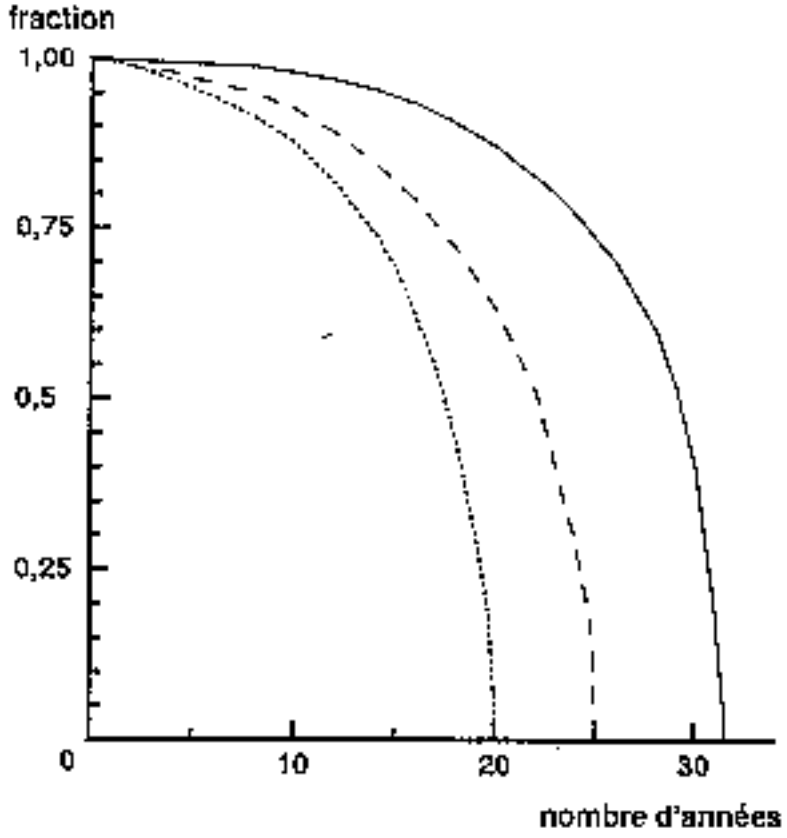


Figure I.10
Diminution du taux moyen de recouvrement des espèces ligneuses dans le temps, dans le nord du Sahel (——), dans le sud du Sahel (- - -), et dans la zone soudanaise (—·—·), à partir du moment de dépassement de la capacité de charge, pour une croissance démographique de 3%.

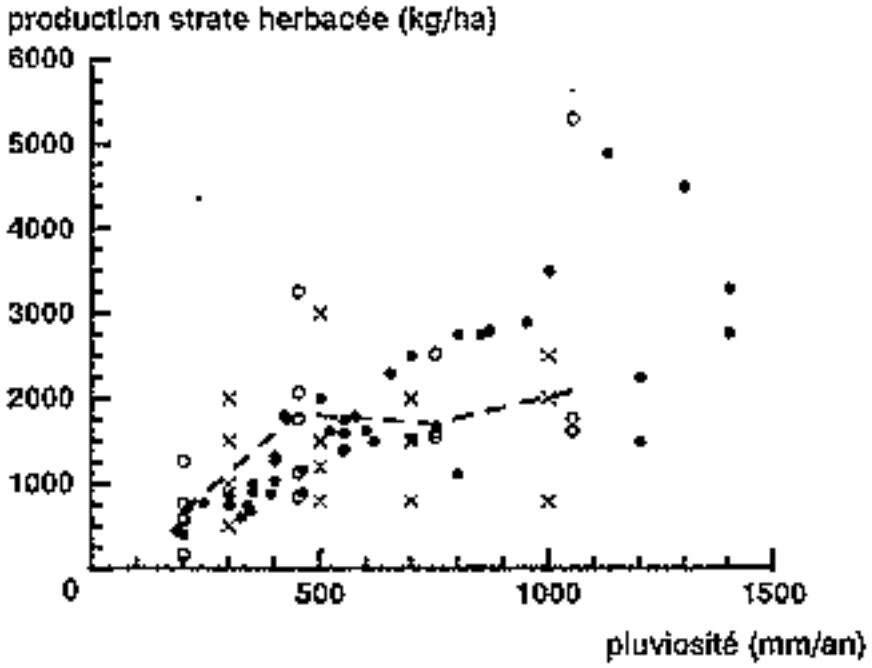


Figure I.11
Comparaison entre la production calculée de la strate herbacée (o ; - - - : moyenne pondérée) et les observations publiées par Le Houérou & Hoste (1977 ; •) et Boudet (1978 ; ×).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_12.GIF

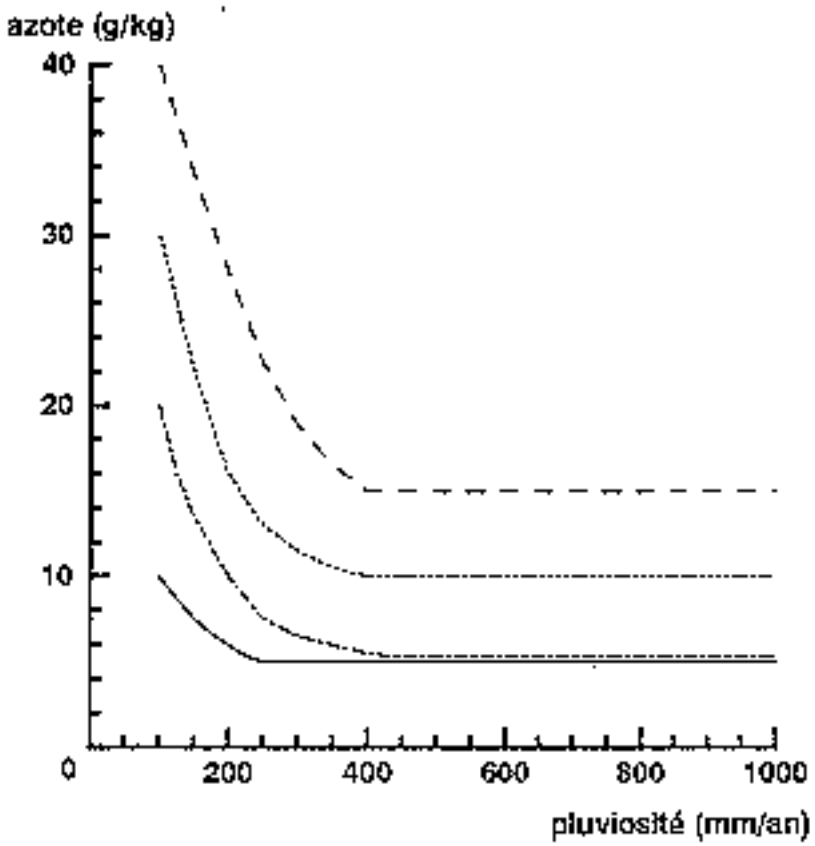


Figure I.12
Taux moyen d'azote à la fin de la saison de croissance pour plantes annuelles à mécanisme C_3 (-----), C_4 (-·-·-), à fixation d'azote et pour graminées pérennes C_4 (——) par rapport à la pluviosité.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982: p. 322.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_12.GIF26-4-2010 11:22:52

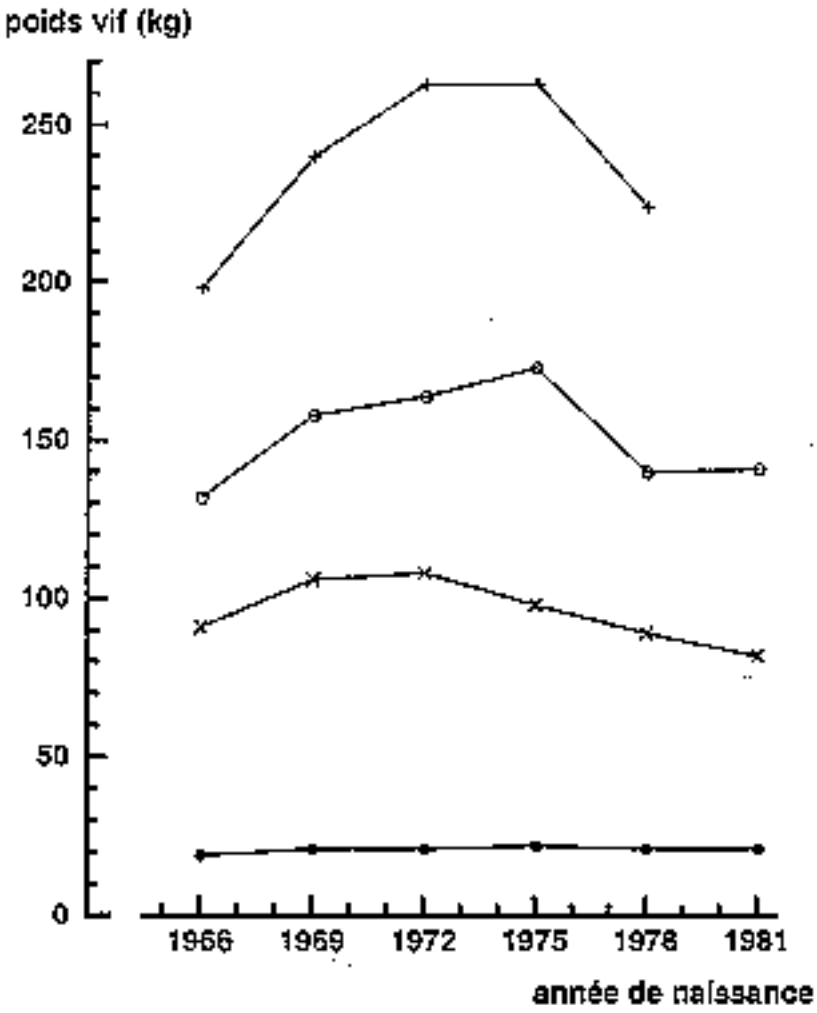


Figure I.13
Evolution du poids moyen du zébu azawak, dans les différentes classes d'âge, à la station expérimentale d'élevage à Toukounous au Niger.

●——● : 0 mois ; ×——× : 6 mois ; ○——○ ; 12 mois ; +——+ : 24 mois.

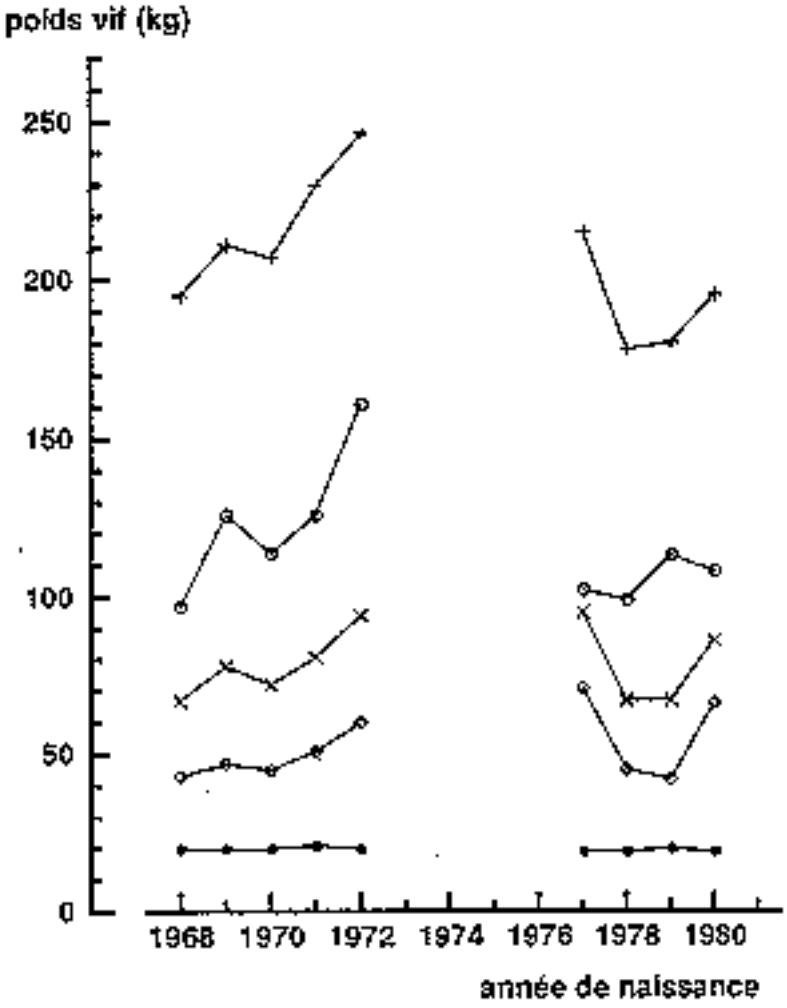


Figure I.14
Evolution du poids moyen du zébu peul et du zébu maure dans les différentes classes d'âge à la « Station du Sahel » à Niono au Mali.

•——• : 0 mois ; 0——0 : 3 mois ; ×——× : 6 mois ; o——o : 12 mois ; +——+ : 24 mois.

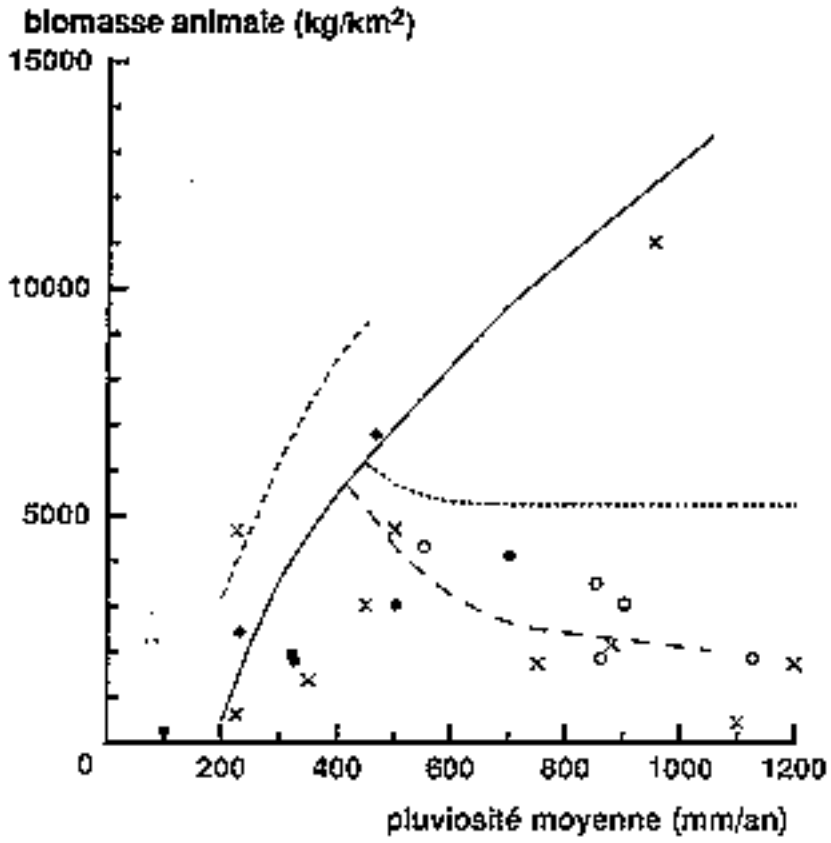


Figure I.15
Comparaison de la biomasse animale relativement élevée dans diverses régions pour l'année 1982, avec la capacité de charge théorique maximum sur la base de la disponibilité fourragère d'une année sèche (tout fourrage ligneux disponible compris ; ———), et avec la capacité de charge basé sur la fraction de la biomasse herbacée d'une année normale, ayant au moins un taux d'azote de 7,5 g/kg (- - - -), sans (— — —) et avec l'influence positive de 20 % du fourrage ligneux disponible (-----).

Les observations individuelles concernent l'estimation de la biomasse animale dans diverses régions pour l'année 1982, Breman & Traoré, 1986a, 1986b et 1987 ; • : Niger ; ○ : Burkina Faso ; × : Mali.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_16.GIF

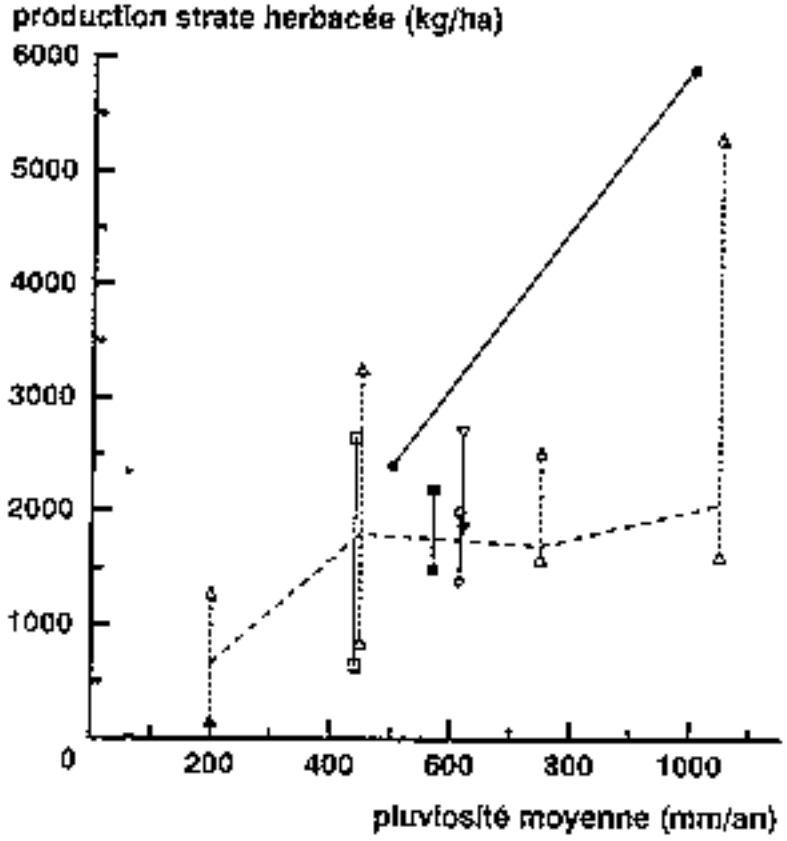


Figure I.16
Comparaison de la relation entre la production de la strate herbacée et la quantité moyenne de précipitations. Sont présentés le Sahel et la zone soudanaise, par rapport à d'autres endroits en Afrique.

——: désert de Namibie (Seely & Walter, 1986 dans Walter, 1986) ; □—□ : Tuli Lowveld ; ■—■ : Nyamandhlovu Sandveld; ◊—◊ : Matopos Sandveld ; ▽—▽ : Matopos Thornveld (Dye & Spear, 1982) ; ●—● : Serengenti (McNaughton, 1985) ; - - - : moyenne pondérée des productions calculées (ce manuel) de la zone sahélien-savane soudanaise ; Δ—Δ : valeurs extrêmes.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN1_16.GIF26-4-2010 11:22:53

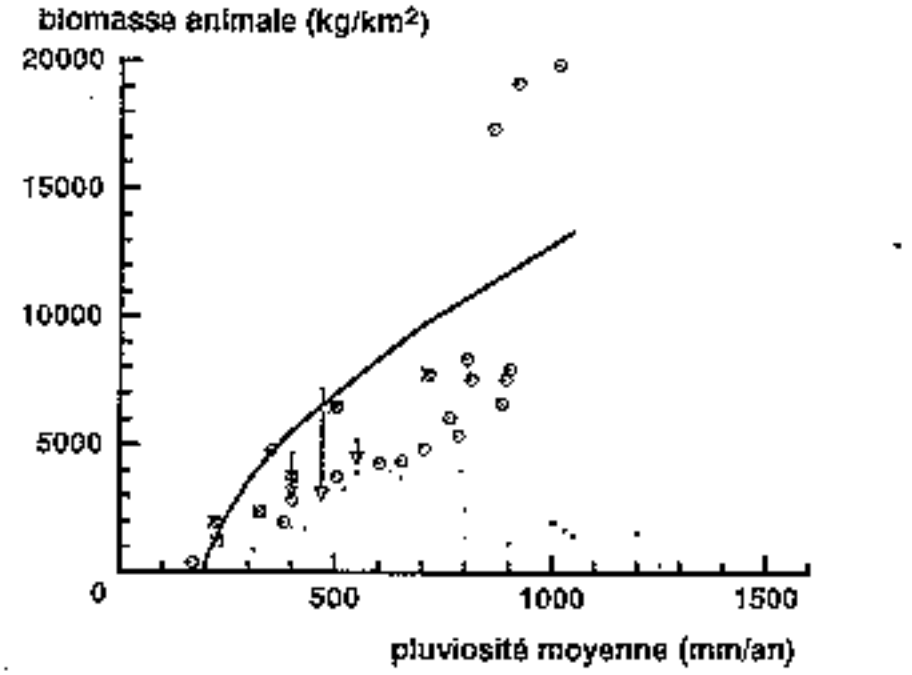


Figure I.17
Comparaison entre la capacité de charge calculée pour les zones sahélienne et soudanaise sur la base de la disponibilité fourragère pendant une année sèche, et la biomasse animale présente dans les parcs naturels et les régions pastorales en Afrique par rapport à la pluviosité moyenne annuelle, compte tenu de la fertilité du sol.

Les points concernent les parcs naturels, les petites croix concernent les régions pastorales. Les observations en provenance de régions à fertilité de sol relativement élevée sont encerclées. Les flèches relient la situation précédant la période sèche de 1981/1983 avec celle qui a suivi. La courbe représente la capacité de charge calculée pour les zones sahélienne et soudanaise sur la base de la disponibilité en éléments nutritifs pendant une année sèche.

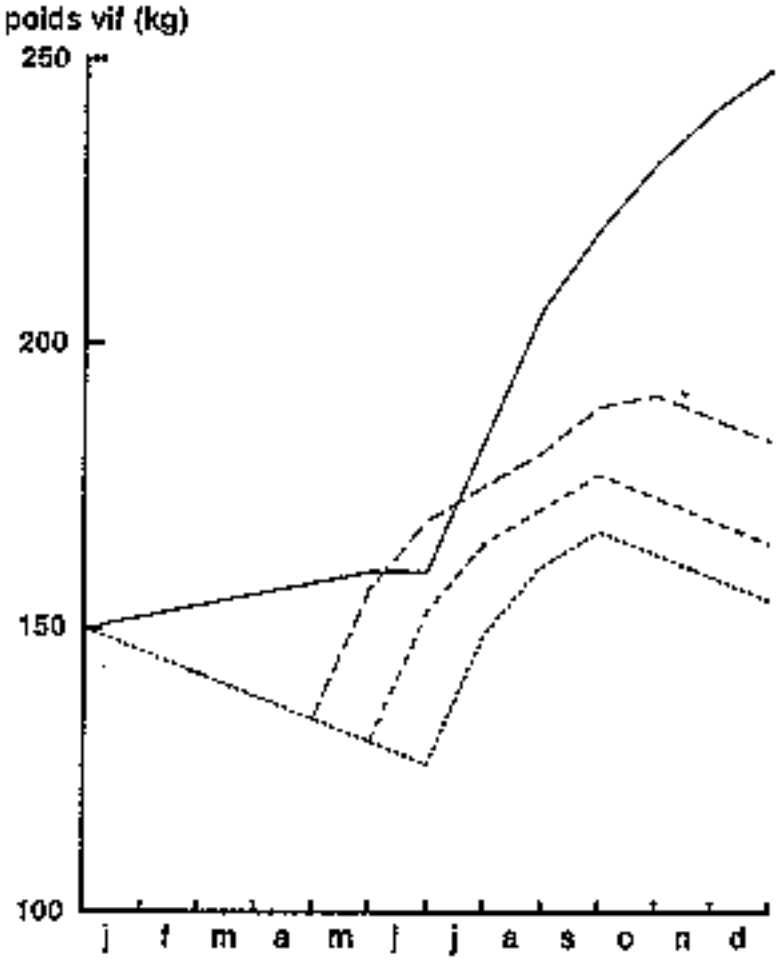


Figure I.18
Courbes de croissance simulées pour les zébus femelles de 150 kg, basées sur la valeur nutritive de la strate herbacée dans les différentes zones de pluviosité.

_____ : < 300 mm ; ----- : 300-600 mm ; - - - - : 600-1200 mm ; _ _ _ _ : > 1200 mm.

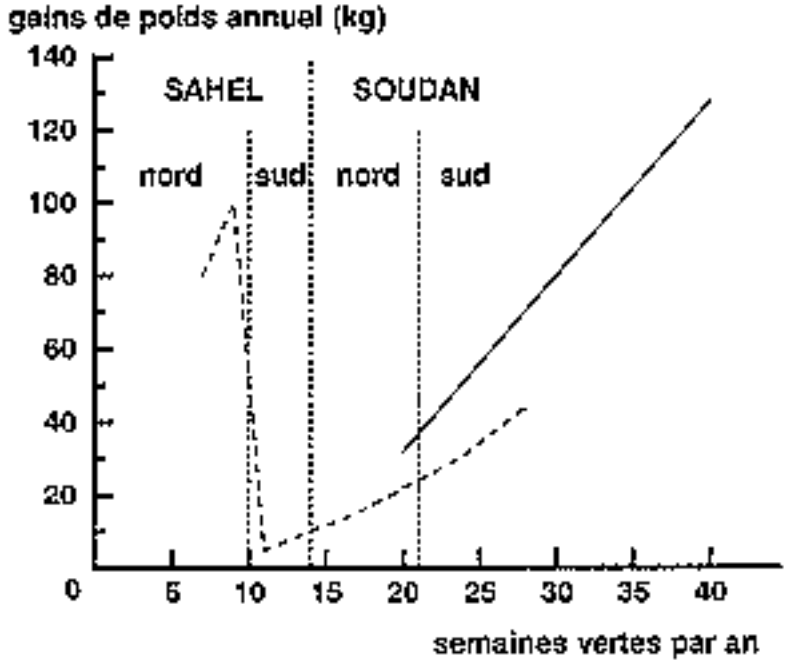


Figure I.19
Relation entre la prise de poids par bovin (élevage sédentaire) et la période pendant laquelle les pâturages naturels des pays sahéliens sont verts (- - - -), comparés à une relation analogue pour l'élevage dans en Australie tropicale (——).

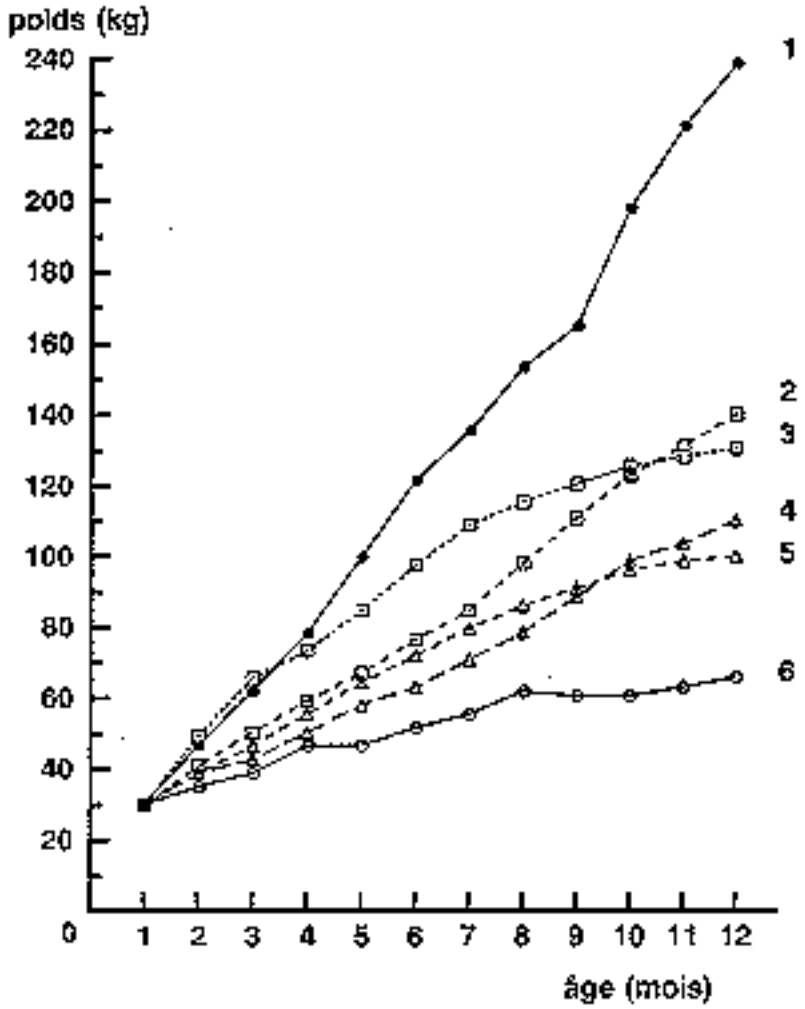


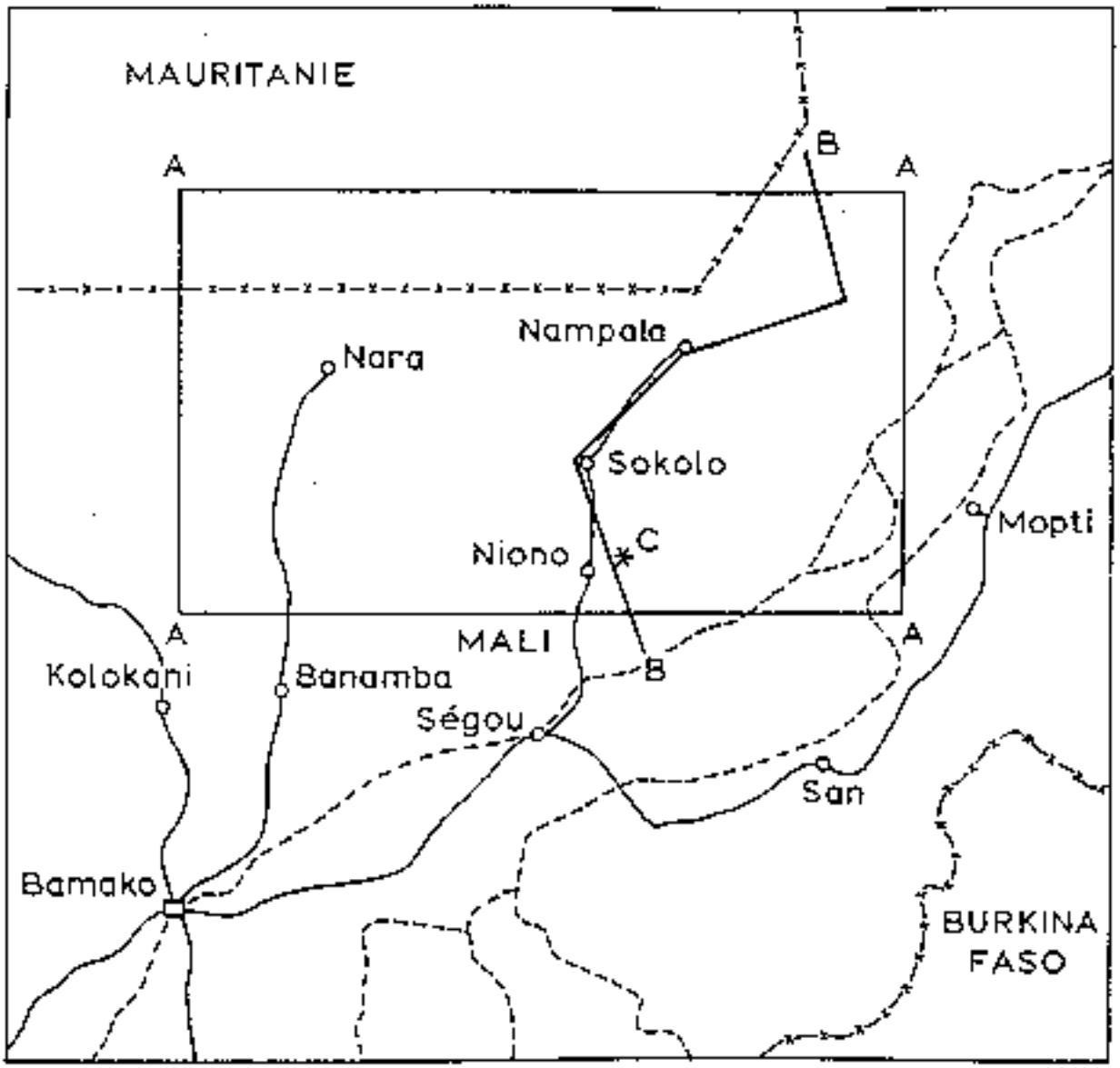
Figure I.20
Evolution du poids pendant la première année des veaux azawak nés au ranch de Ekrafane au Niger, pour différents niveaux d'alimentation:

1 : Bon niveau: lait donné à partir d'un seau, sevrage après 3 mois, puis alimentés avec des suppléments de fourrage basés sur de la poudre de lait et de la farine de froment.

2 et 3 : Niveau raisonnable: les veaux restent auprès de la vache, la totalité de la production de lait est réservée pour le veau, pas de suppléments de fourrage (courbe 2 : veaux nés en janvier et courbe 3 : veaux nés en juillet).

4 et 5 : Niveau médiocre: les veaux restent auprès de la vache, 30-60% de la production du lait destiné à la consommation humaine, 70-40% destiné au veau, pas de suppléments (courbe 4 : veaux nés en janvier; courbe 5 : veaux nés en juillet).

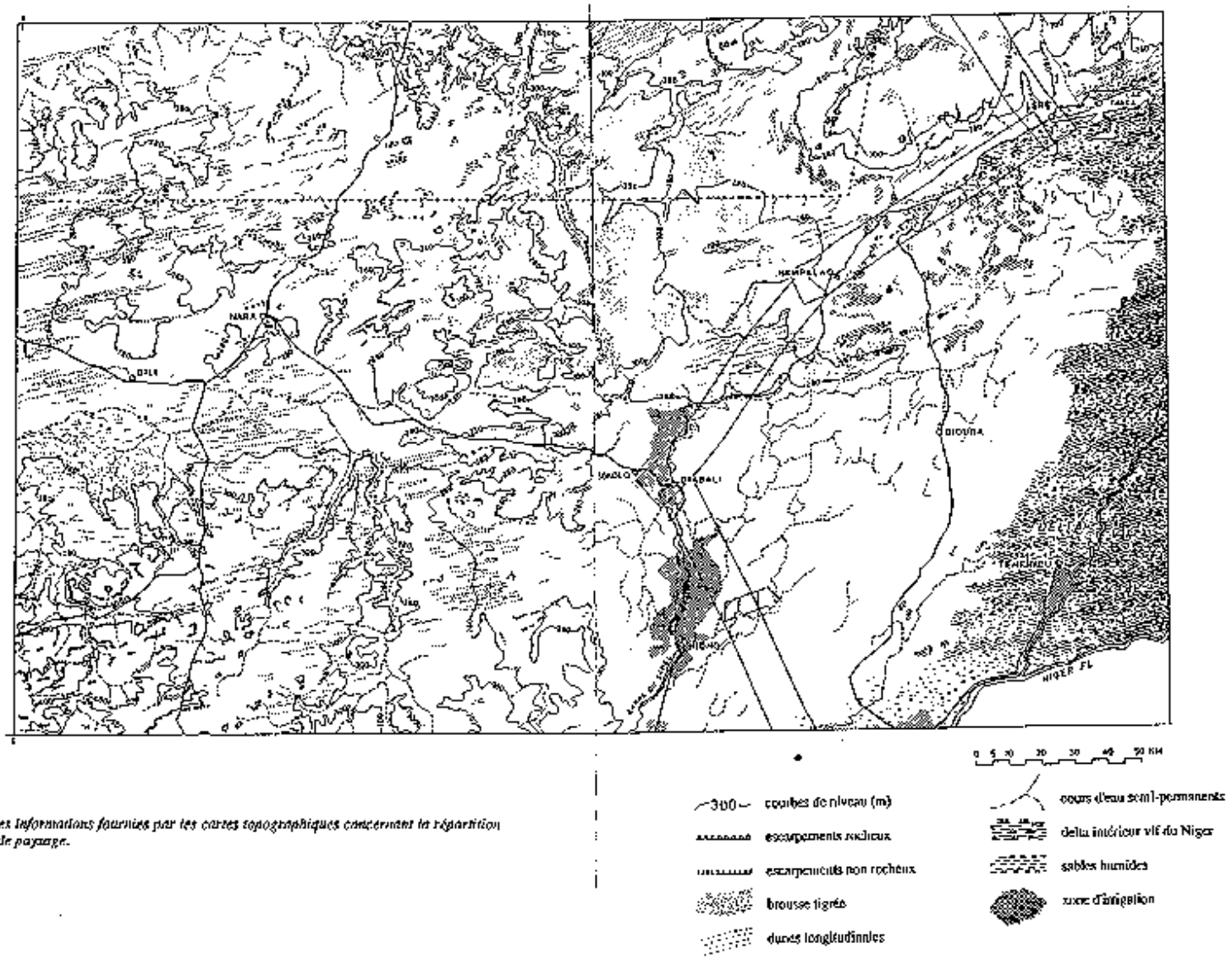
6 : Mauvais niveau: les veaux restent auprès de la vache, seulement 0,66 l de lait disponible par jour pour le veau, pas de suppléments.



Carte II.1
Localisation géographique au Mali des zones concernées par les trois exemples.

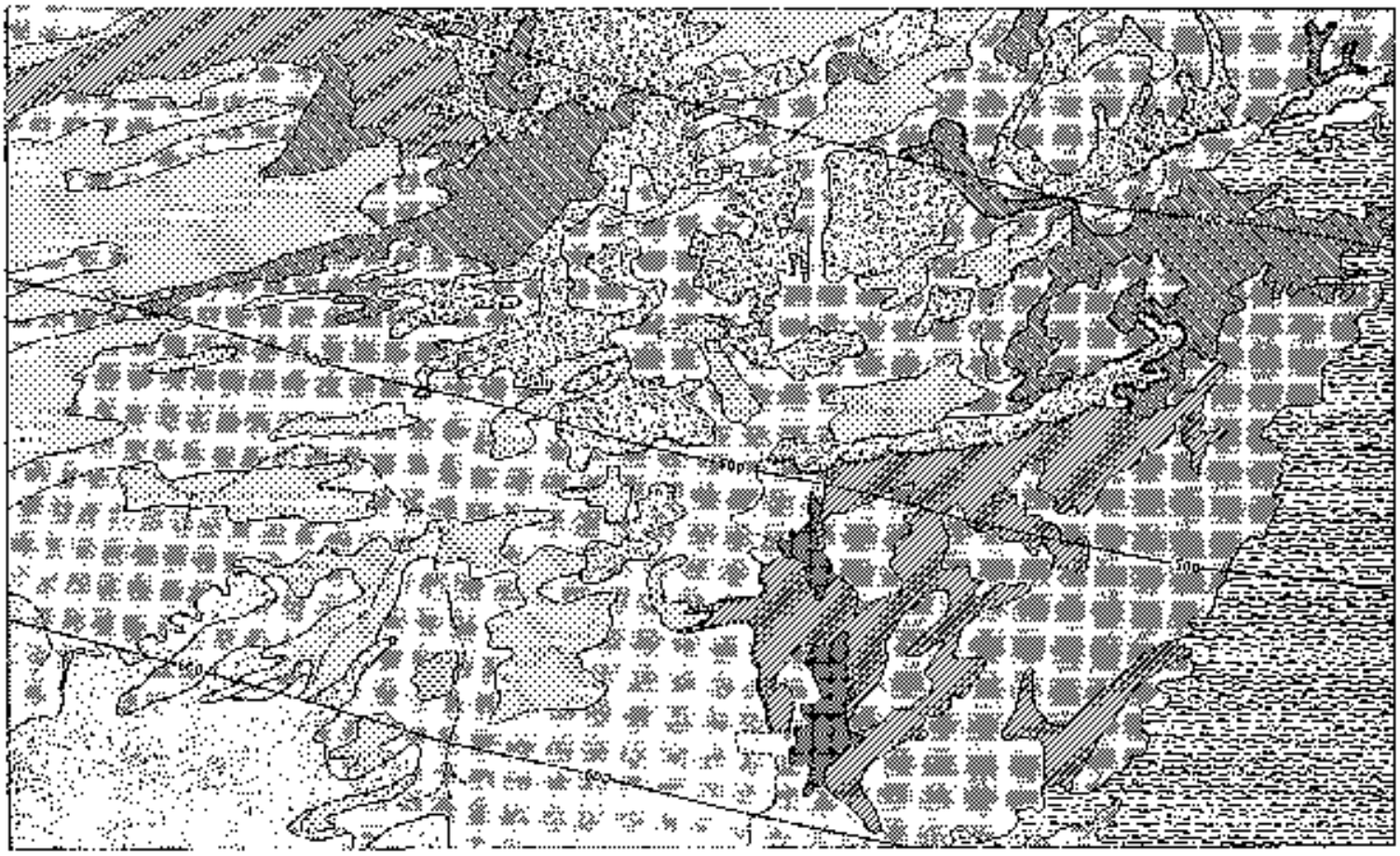
A : Evaluation globale (II.2) ;
B : Evaluation semi-détaillée : le trajet nord-sud (II.3) ;
C : Evaluation détaillée : le ranch près de Niono (II.4).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2C_2.GIF



Carte II.2
Résumé des informations fournies par les cartes topographiques concernant la répartition en unités de paysage.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2C_2.GIF26-4-2010 11:22:55



Ensemble fluviatile ou lacustre (F)

Ensemble détritique (Dt)

Ensemble sablonneux éolien (S)

dunes longitudinales (S_d)

dunes aplanies et plaines sablonneuses (Sa)

plaines limoneuses et argileuses, localement couvertes par des dunes sablo-limoneuses et beaucoup de cours d'eau temporaires dus à l'écoulement (F_{ec})

« sables humides » dépressions à sols lourds (F_{sh})

zones inondées (F_{in})

isohyètes (mm)

lac

Carte II.3
Les différentes unités de paysage selon les informations de la carte II.2

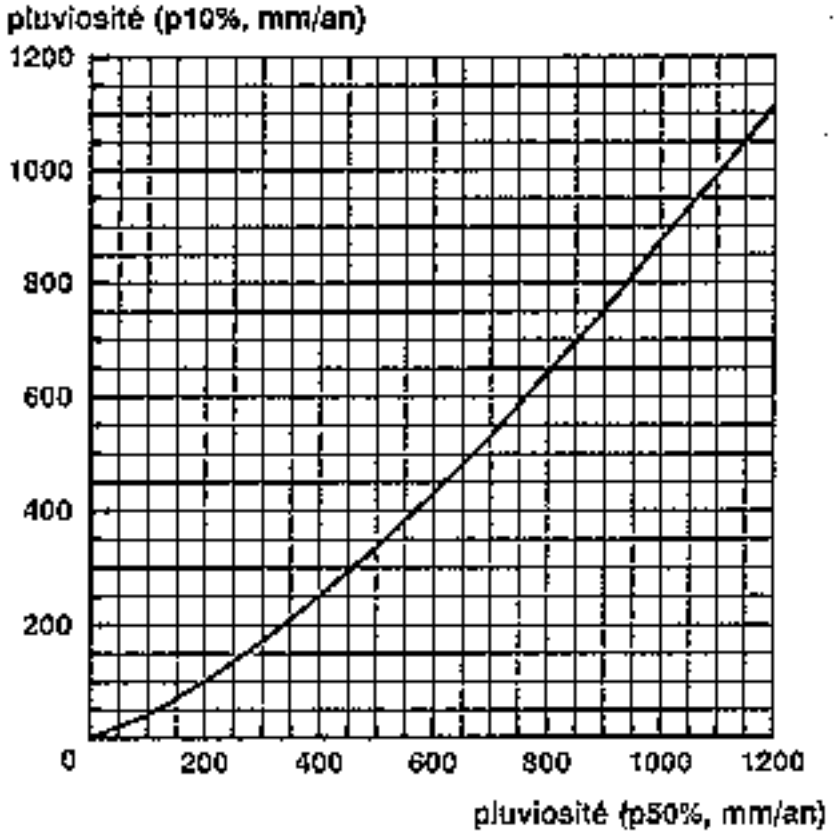


Figure II.1
Pluviosité pendant les années sèches (p10%) par rapport à la pluviosité pendant les années moyennes (p50%).

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 47.

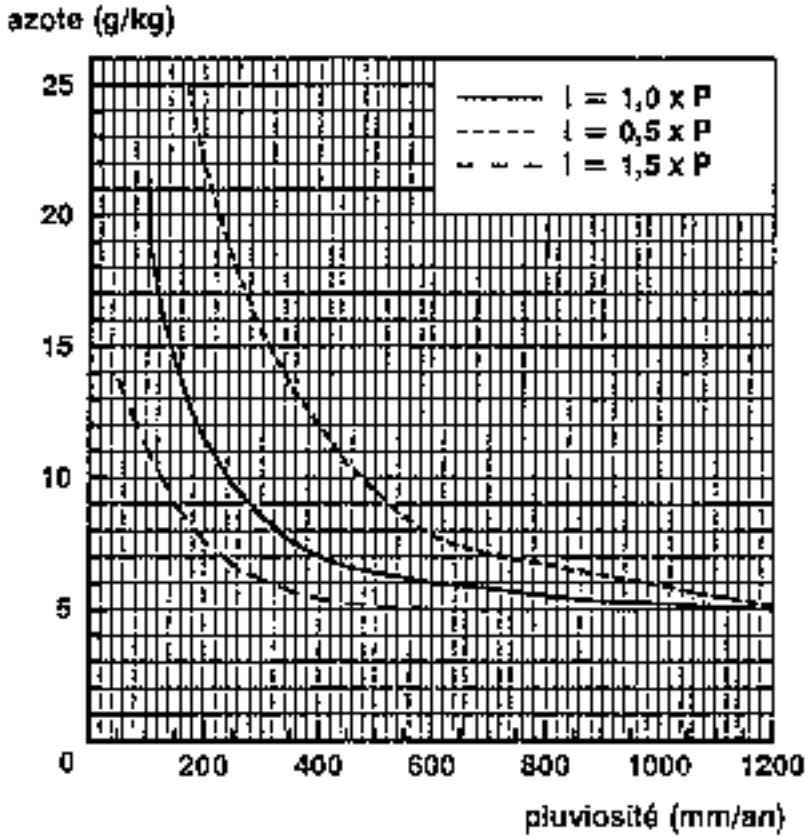
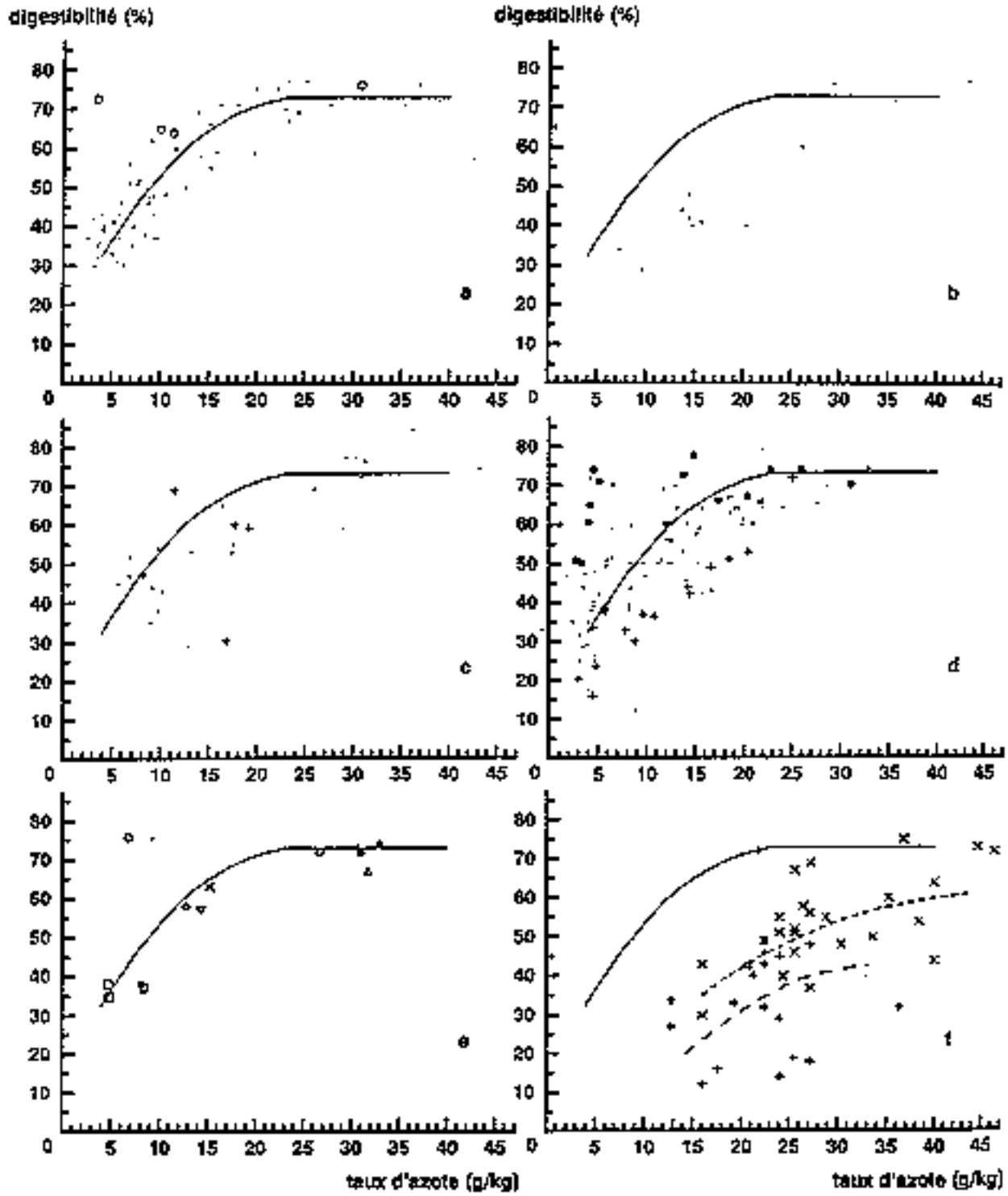


Figure II.3
Taux d'azote (g/kg de matière sèche) de la strate herbacée à la fin de la saison de croissance, par rapport à la pluviosité pendant les années moyennes (p50%) pour trois situations : infiltration homogène ($I = 1,0 \times P$), ruissellement ($R = 0,5$; $I = 0,5 \times P$) et concentration des écoulements ($R = -0,5$; $I = 1,5 \times P$).



Figures III.20a-f
Rapport entre la digestibilité in vitro de la matière organique et le taux d'azote de la matière sèche des plantes en provenance des pâturages naturels non fertilisés de pays sahéliens.

——— rapport pour les graminées annuelles ; a : graminées annuelles (·), avec o : *Echinochloa colona* ; b légumineuses (·) ; c dicotylédones annuelles (·) et *Cyperaceae* (+) ; d : graminées pérennes (·), avec + : *Vetiveria nigritana* et • *Echinochloa pyramidalis & stagnina* ; e : végétations herbacées dominées par : □ *Vetiveria nigritana*, ○ *Echinochloa stagnina*, △ *Panicum laetum*, + *Schoenefeldia gracilis*, × *Chloris & Dactyloctenium*, ◊ *Sporobolus helvolus* ; ■ *Ipomaea verticillata*, ▲ Oryza longistamata et ▼ menu journalier quelconque ; f : espèces ligneuses avec ×. ----- ajustés.

Schoenefeldia gracilis, × *Chloris & Dactyloctenium*, ◊ *Sporobolus helvolus* ; ■ *Ipomaea verticillata*, • Oryza longistamata et ▾ menu journalier quelconque ; f : espèces ligneuses avec ×, ----- appétées, et +, - - - non appétées.

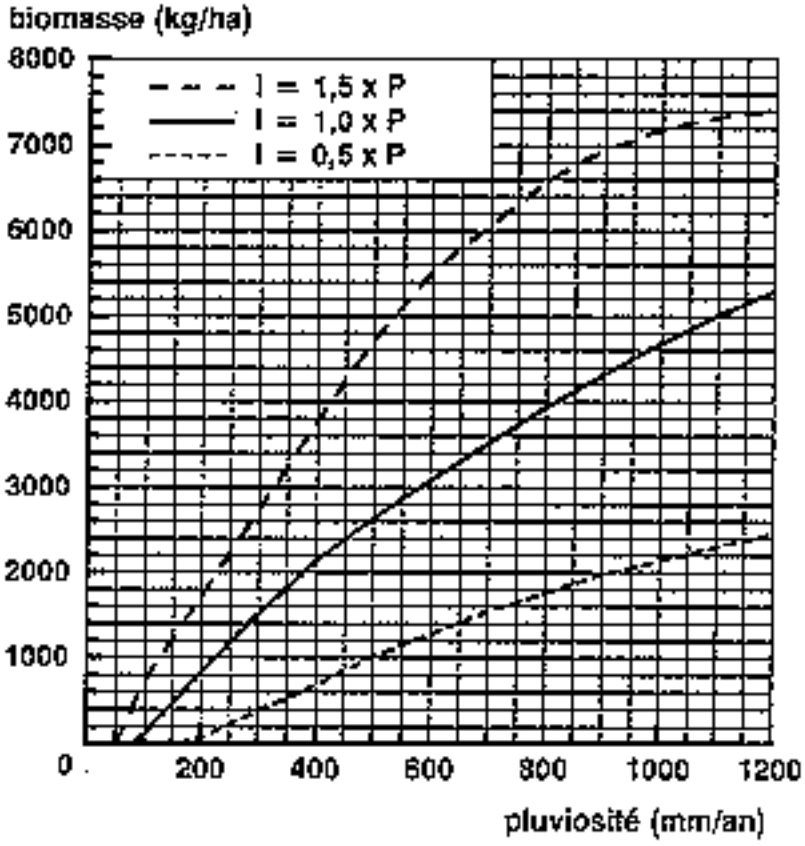


Figure II.2
Production de la biomasse (en matière sèche) par la strate herbacée, par rapport à la pluviosité pendant les années moyennes (p50%) pour trois situations : infiltration homogène ($I = 1,0 \times P$), ruissellement ($R = 0,5$; $I = 0,5 \times P$) et concentration des écoulements ($R = -0,5$; $I = 1,5 \times P$).

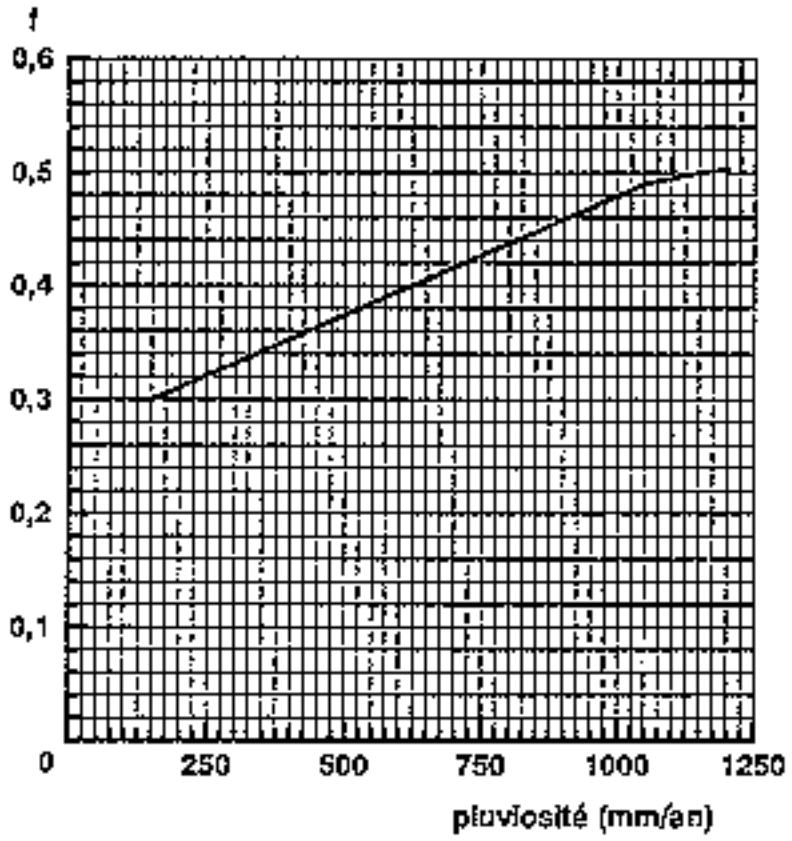


Figure II.4
Valeurs de la fraction moyenne de N_b perdue annuellement (f) par rapport aux isohyètes.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 305.

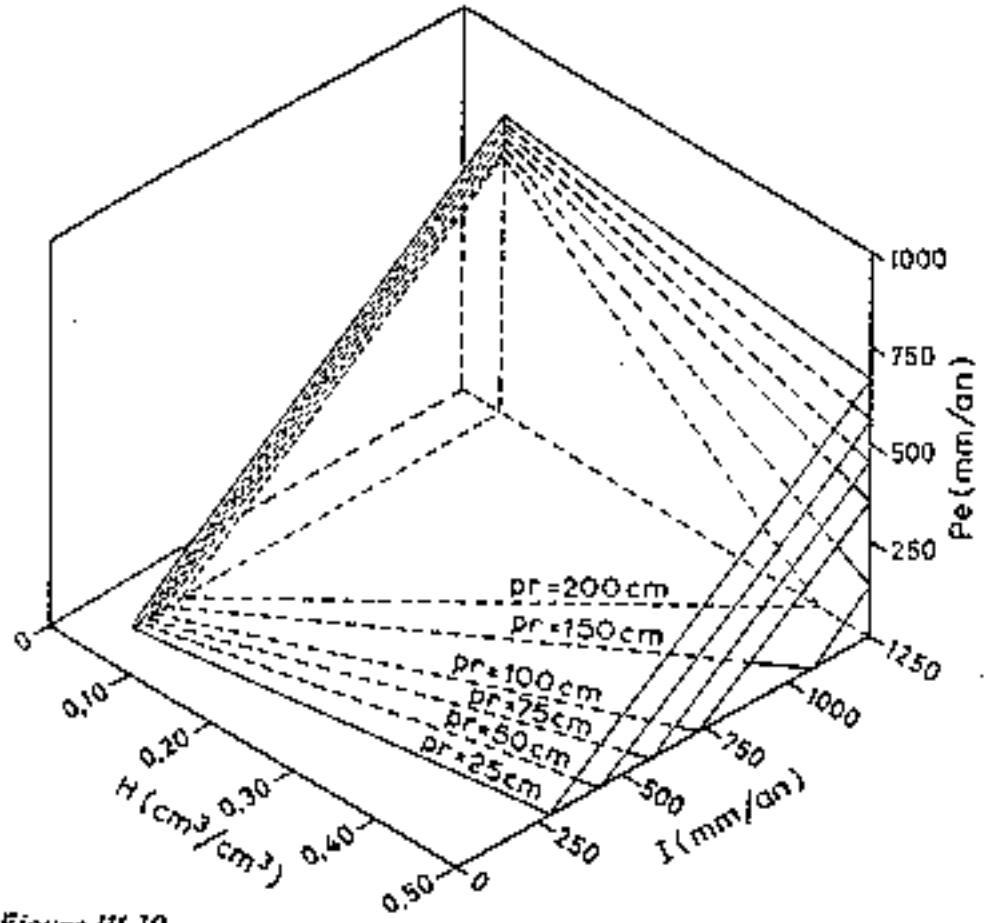


Figure III.19
Rapport tridimensionnel entre la quantité simulée de pertes d'eau hors du profil (Pe), la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour les types de sols variant en taux d'humidité pour la capacité au champ (H), et une profondeur variable du profil (pr).

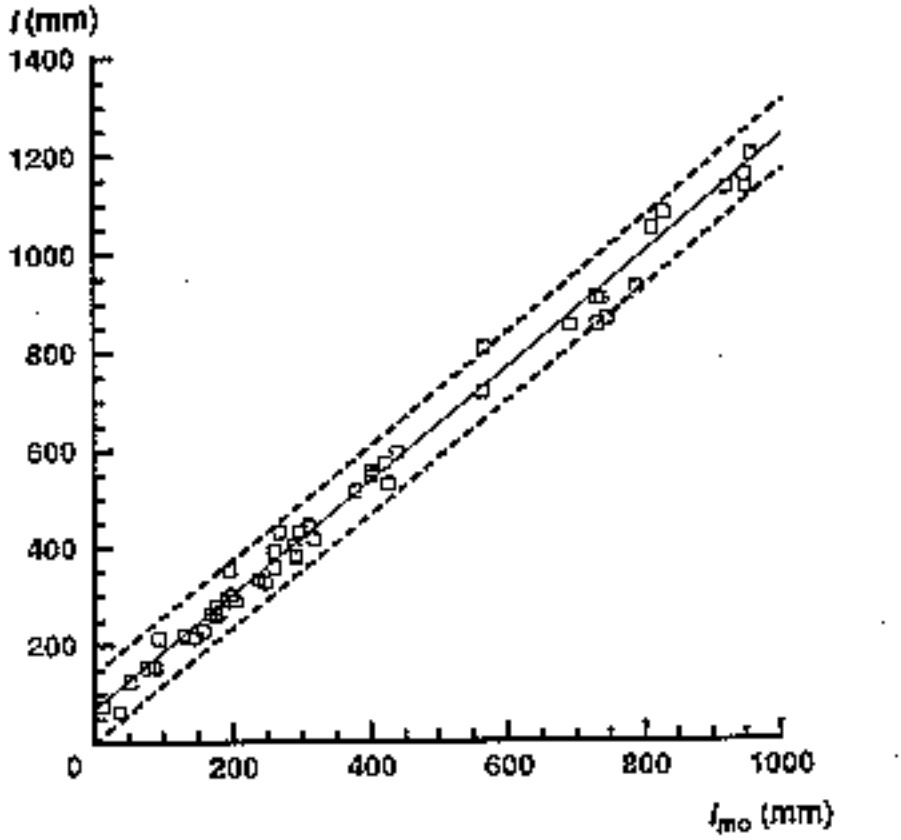


Figure III.13
Quantité annuelle d'eau infiltrée (I) calculée selon l'équation I = P(1-R) en tant que fonction de la quantité annuelle d'eau infiltrée calculée à l'aide du modèle de simulation (I_{mo}), pour des années à pluviosité fortement variable du point de vue de la quantité et de la répartition.

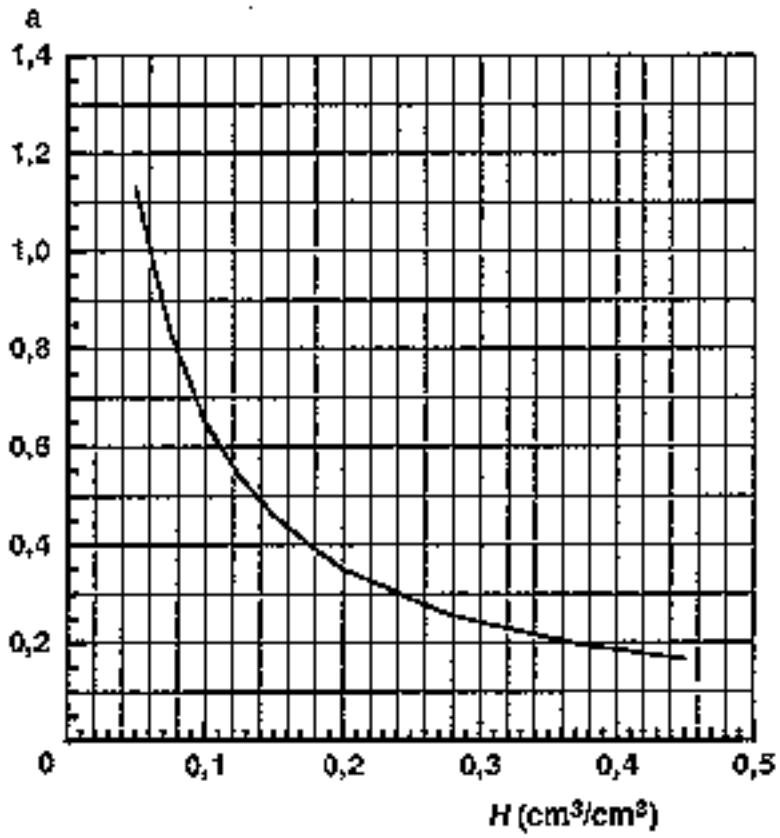


Figure II.5
Rapport entre la variable a (voir explication dans III.2.3) et le taux d'humidité à la capacité au champ (H).

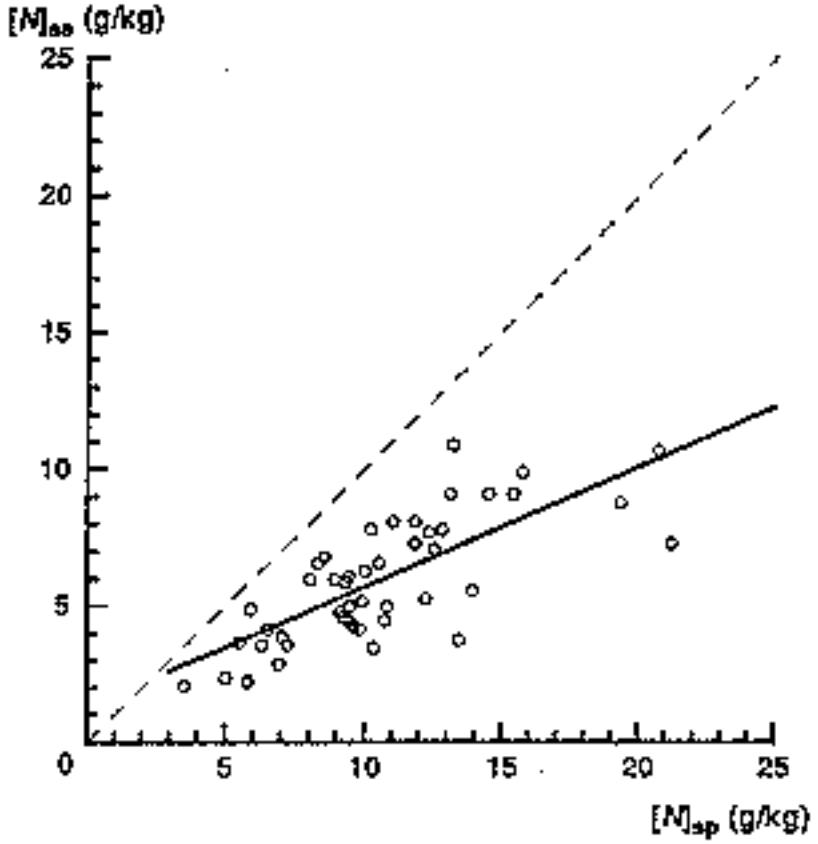


Figure II.6
Rapport entre le taux d'azote à la fin de la saison sèche ($[N]_{ss}$) et le taux d'azote à la fin de la saison des pluies ($[N]_{sp}$) ; ce rapport est basé sur les données obtenues sur le terrain pendant 4 ans sur un trajet nord-sud au Mali.

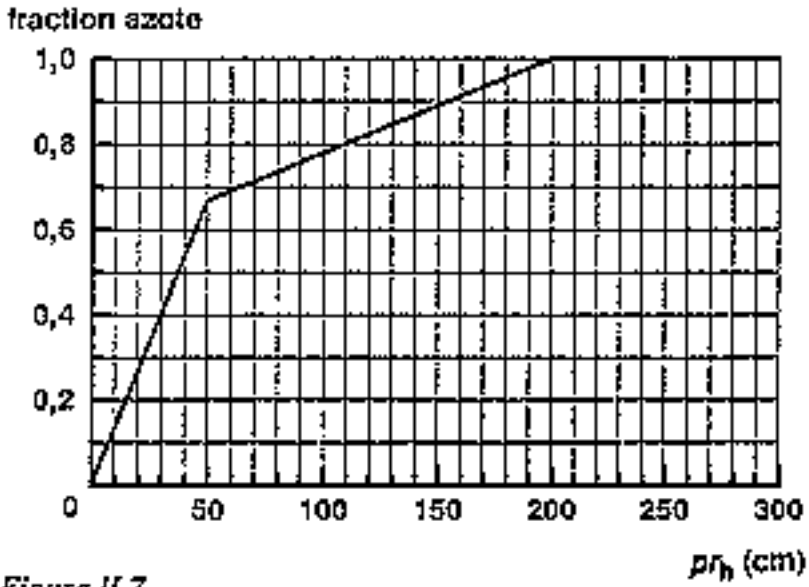


Figure II.7
Fraction d'azote dans la biomasse aérienne de la strate herbacée (N_b) par rapport à la profondeur d'humidification du profil (pr_h).

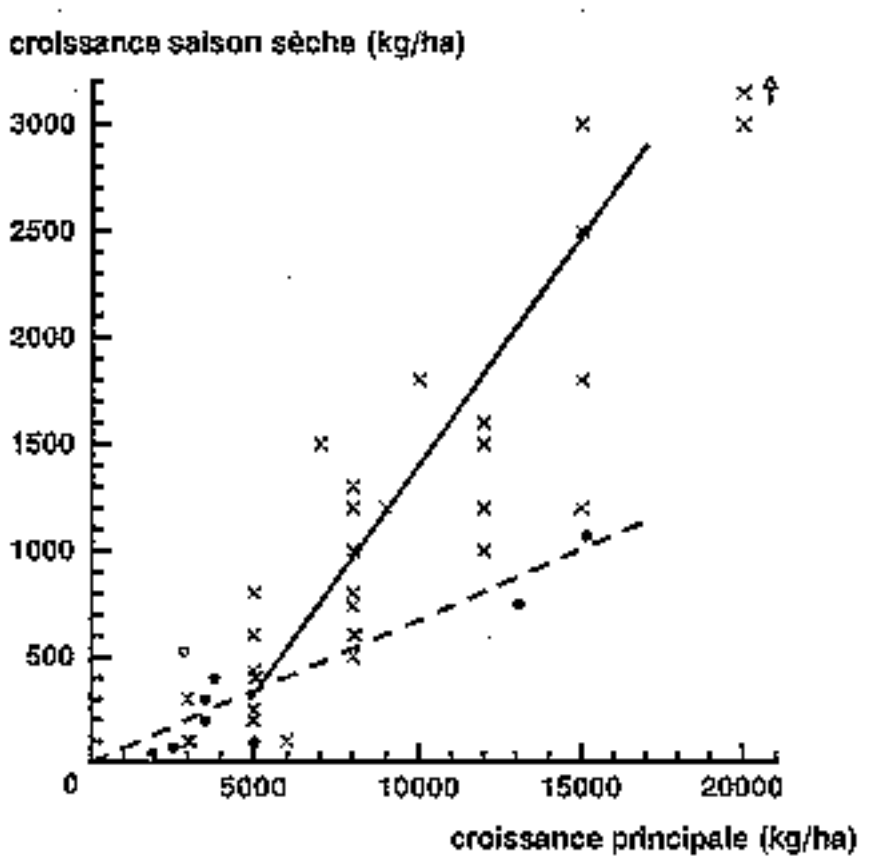
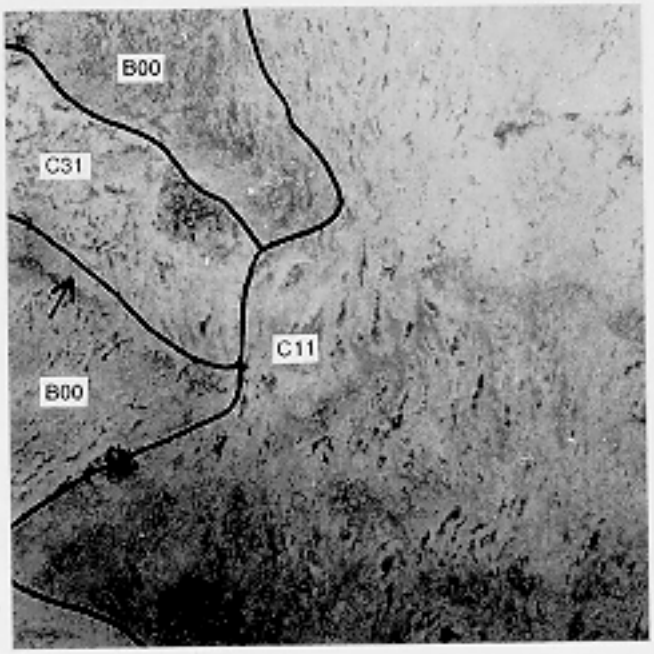
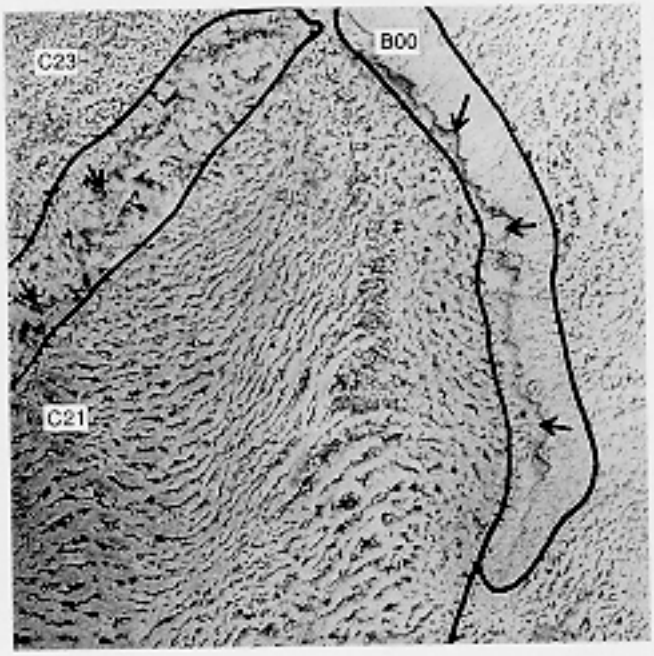


Figure III.35
Rapport entre la production aérienne des graminées pérennes pendant la saison des pluies (croissance principale) et pendant la saison sèche (croissance secondaire, ou repousse après fauche ou feux), dans la zone de la savane (•) et dans la plaine d'inondation (delta central du Niger; ×).



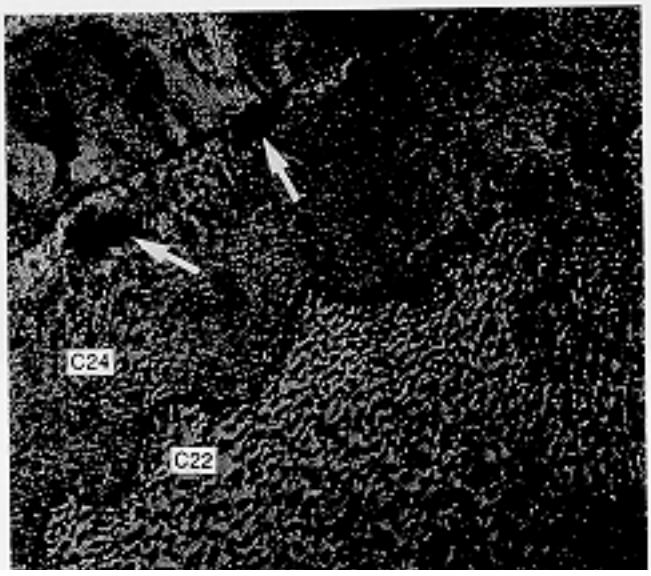
a



b

Photo II.4
Plateaux latéritiques avec de la brousse tigrée, pour une pluviosité moyenne de 300 (a), 350 (b) et 480 mm (c).

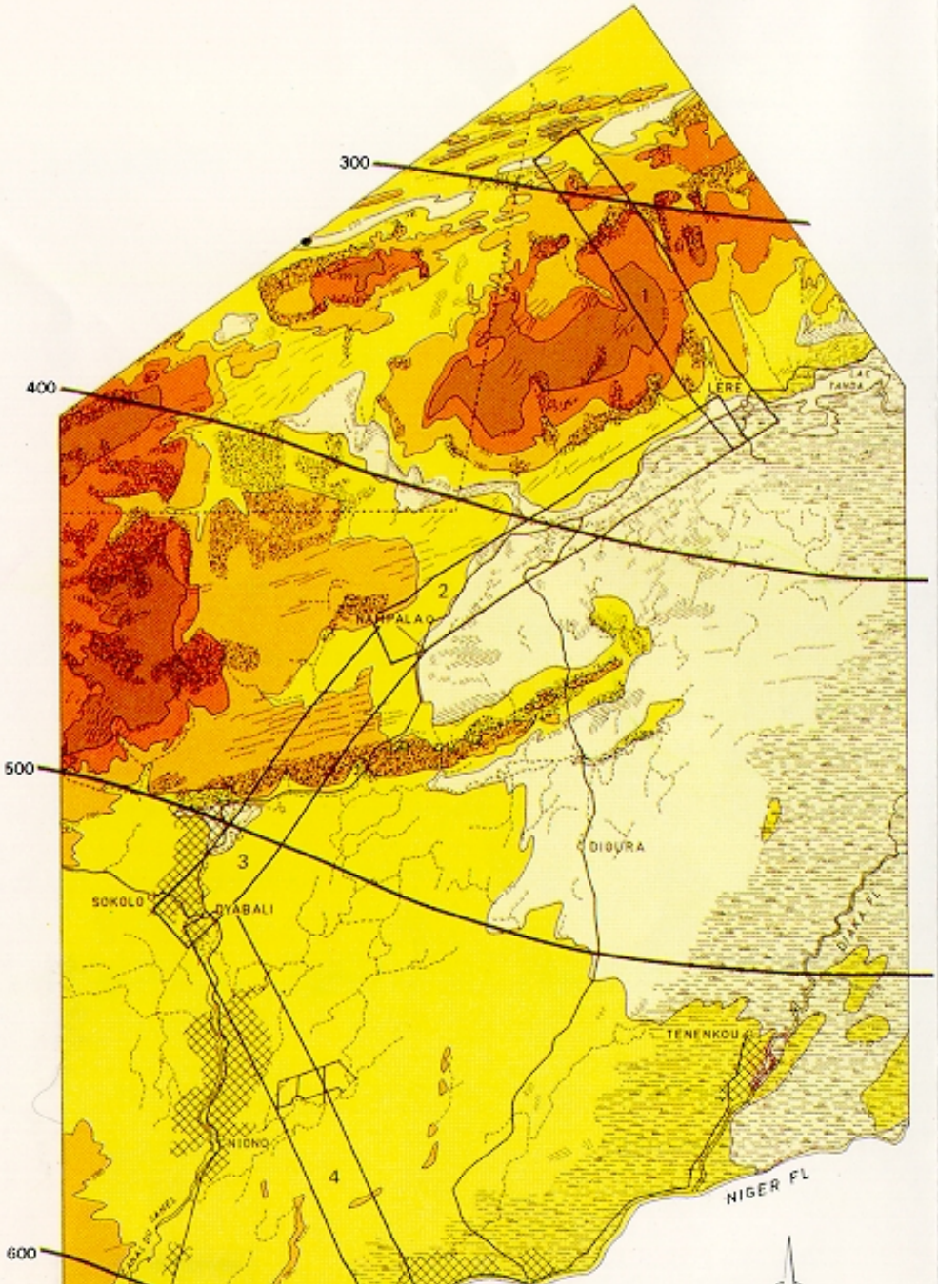
Les flèches indiquent des affleurements rocheux et des escarpements ; respectivement partie 3, partie 1, et partie 1, carte en annexe ; échelle 1 : 49.000.



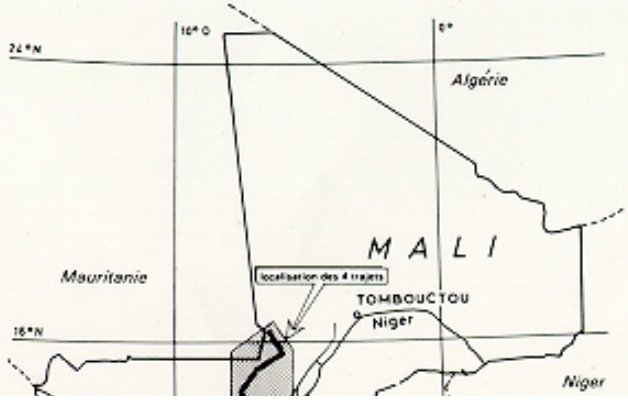
c

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/CA_GEOG.JPG

Géographie physique de la zone d'étude et sa localisation précise.



Localisation globale de la zone d'étude.



http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/CA_GEOG.JPG (1 of 2)26-4-2010 11:23:07

KE-MACINA
N
0 5 10 20 30 40 50 KM
MARKALA

KAYES
SEGOU
Sénégal
BAMAKO
Burkina Faso
Guinée
Côte d'Ivoire

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_1.GIF

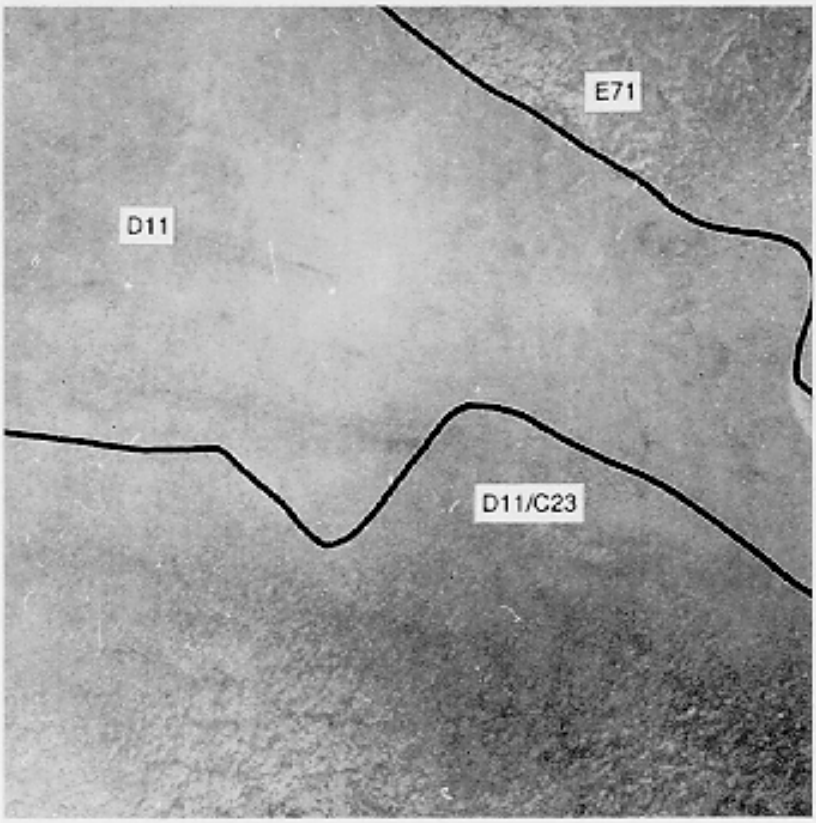


Photo II.1
Végétation homogène, sur des sols situés à altitude relativement élevée : indique un substrat sablonneux à infiltration homogène.

D11 ; partie 1, carte en annexe, 300 mm/an ; échelle 1 : 37.000.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_1.GIF26-4-2010 11:23:08

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_2.GIF

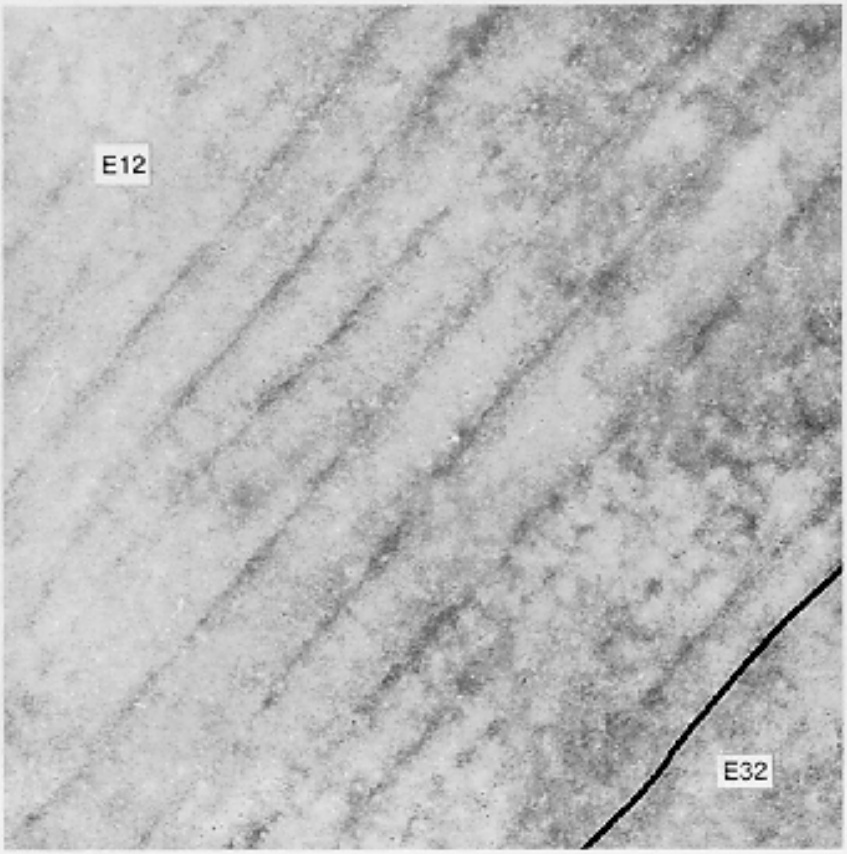
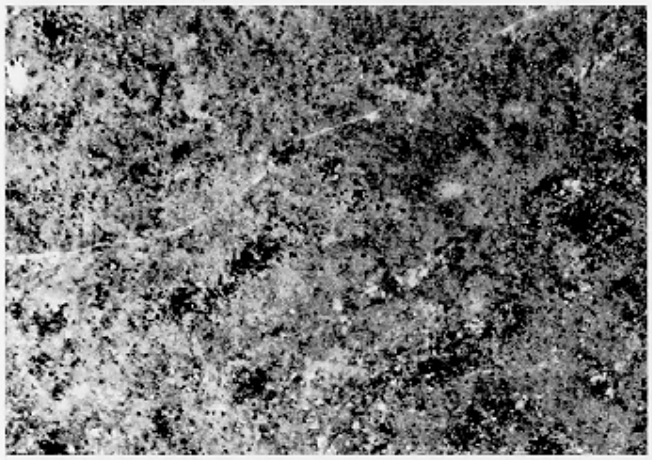


Photo II.2
Différence de la végétation entre les dunes sablonneuses et les vallées : indique un sable limoneux ou bien du sable très penté.

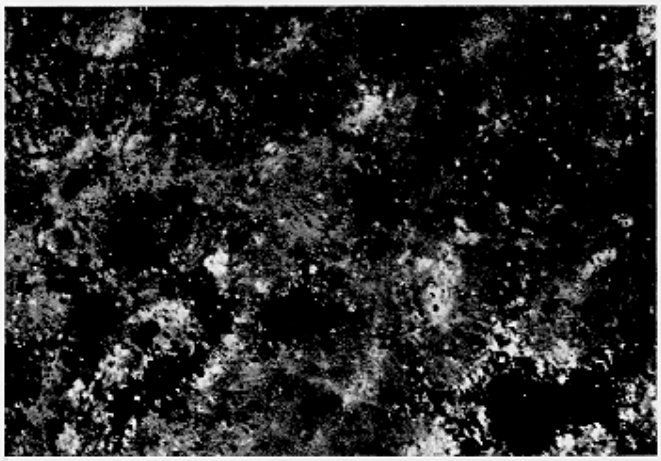
Partie 3, carte en annexe, 470 mm/an ; échelle 1 : 43.000.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_2.GIF26-4-2010 11:23:10

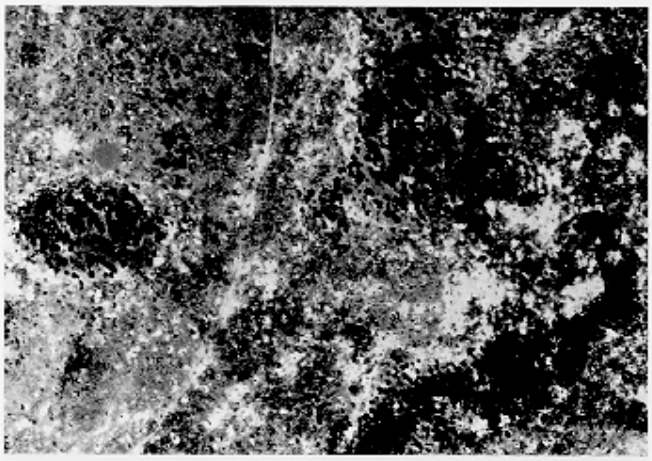
http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_3.GIF



a



b

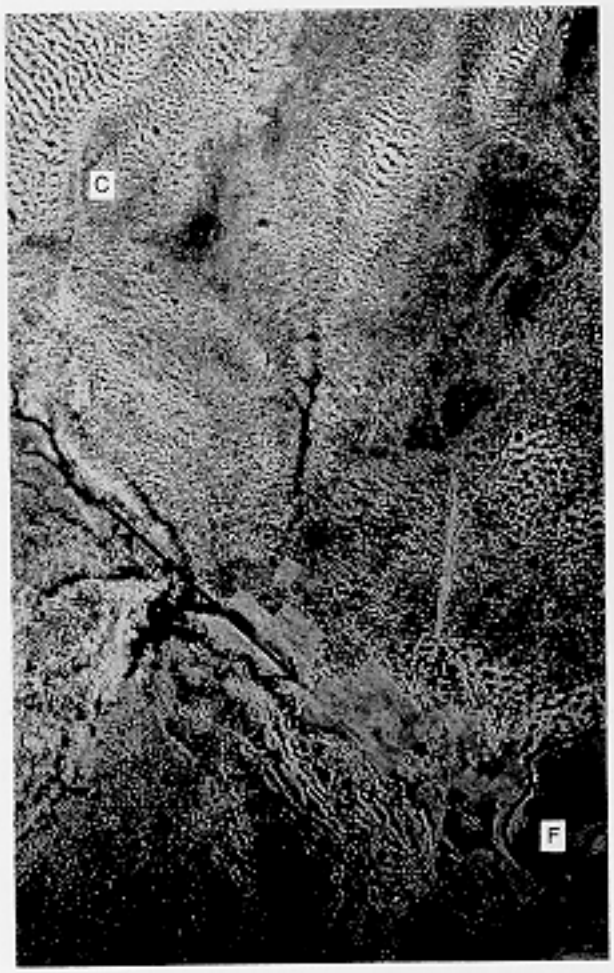


c

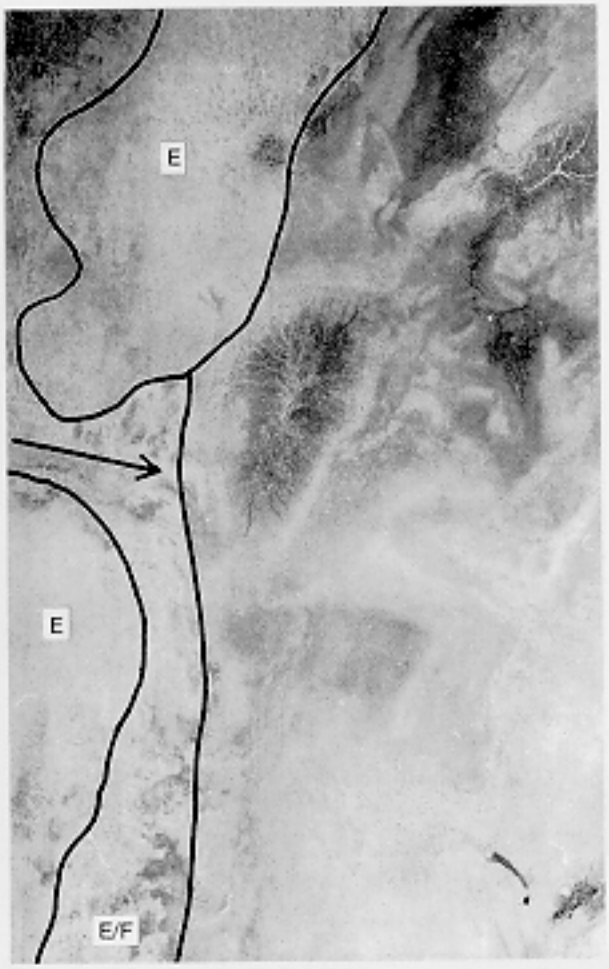
d

Photo II.3
Paysage de mosaïques des ermés et fourrés dans le delta mort, formé par du sable limoneux sur un sous-sol à texture plus lourde (a et b). Puis, un paysage comparable avec b, mais avec des aires à texture localement plus lourde à la surface (c), comparé à une forme dégradée de b (d) par suite de surexploitation.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_3.GIF26-4-2010 11:23:14



a



b

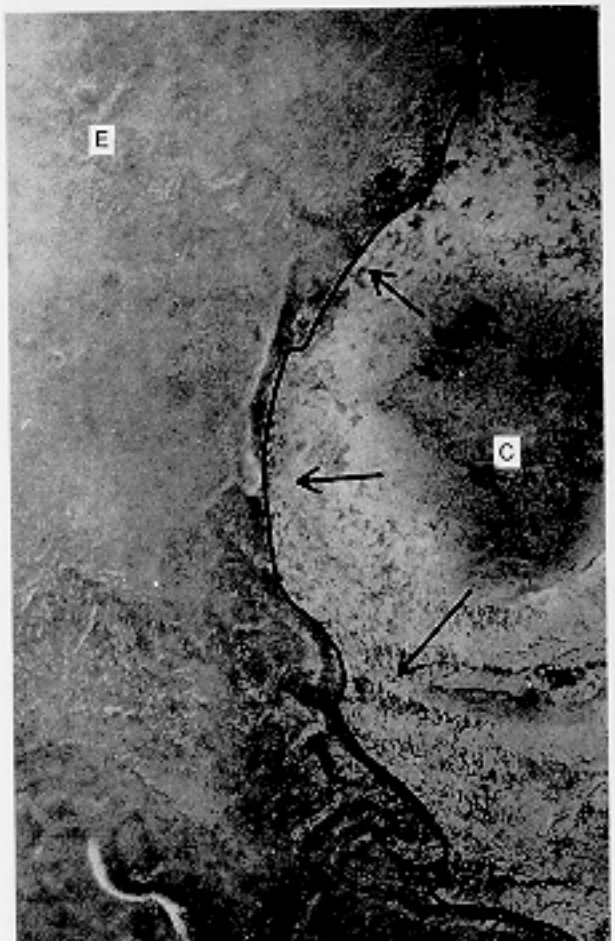
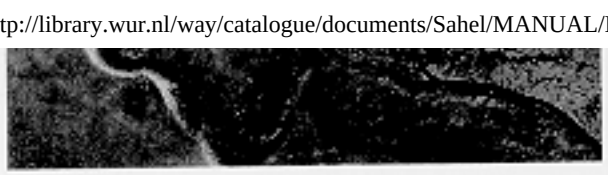
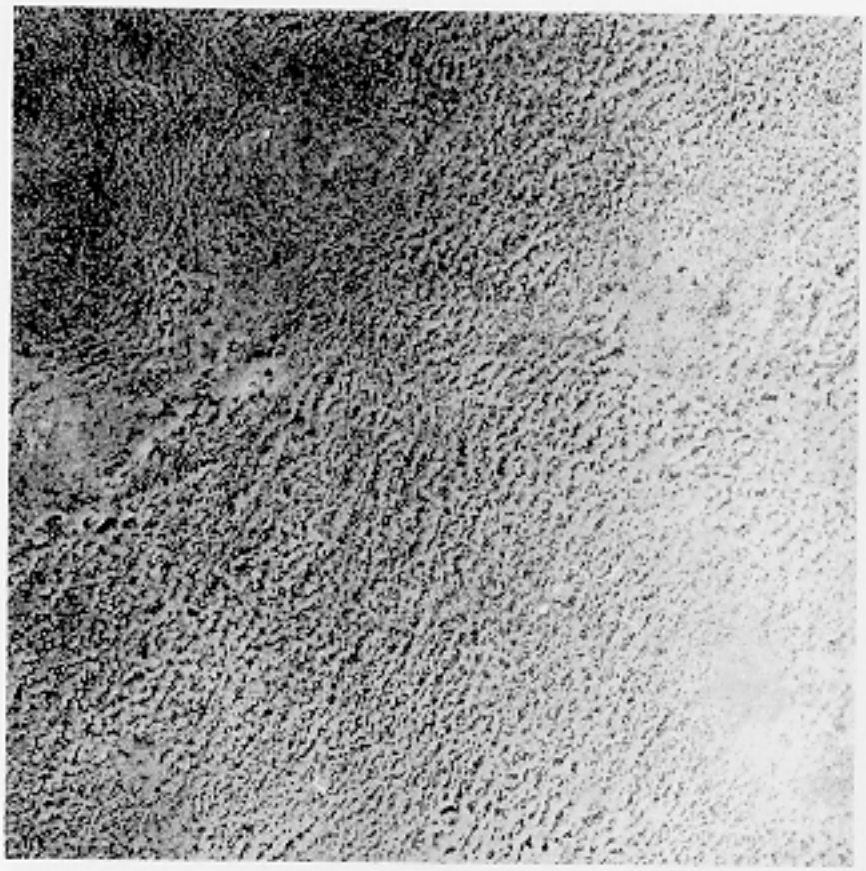


Photo II.6
Exemples de redistribution entre les unités de paysage : plateau latéritique (C) au flanc nord du delta mort (F ; a) ; canal de drainage qui traverse l'ensemble éolien (E) et relie l'ensemble détritique avec l'ensemble fluviatile (F ; b) ; ruissellement depuis le plateau latéritique (C) vers l'ensemble éolien (E) situé plus bas (c).

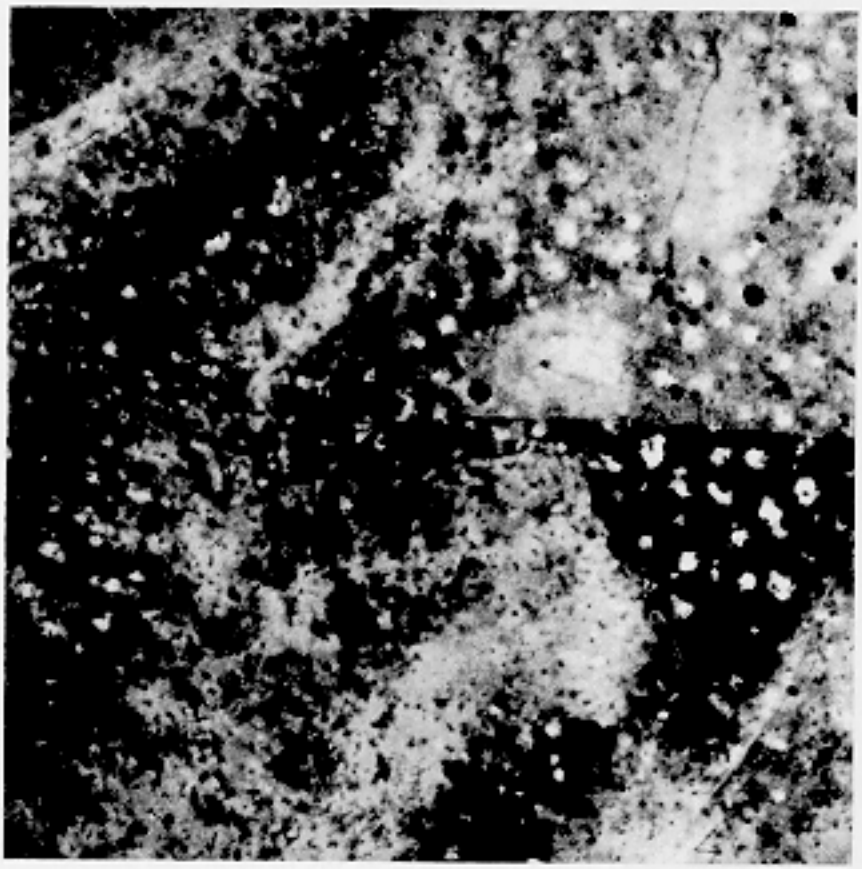
Les flèches indiquent la direction des courants incidentels ; respectivement partie 3, carte en annexe, 480 mm/an, partie 2, 400 mm/an, et partie 1, 305 mm/an ; échelles 1 : 76.000 (a et b), 1 : 53.000 (c).



C



a



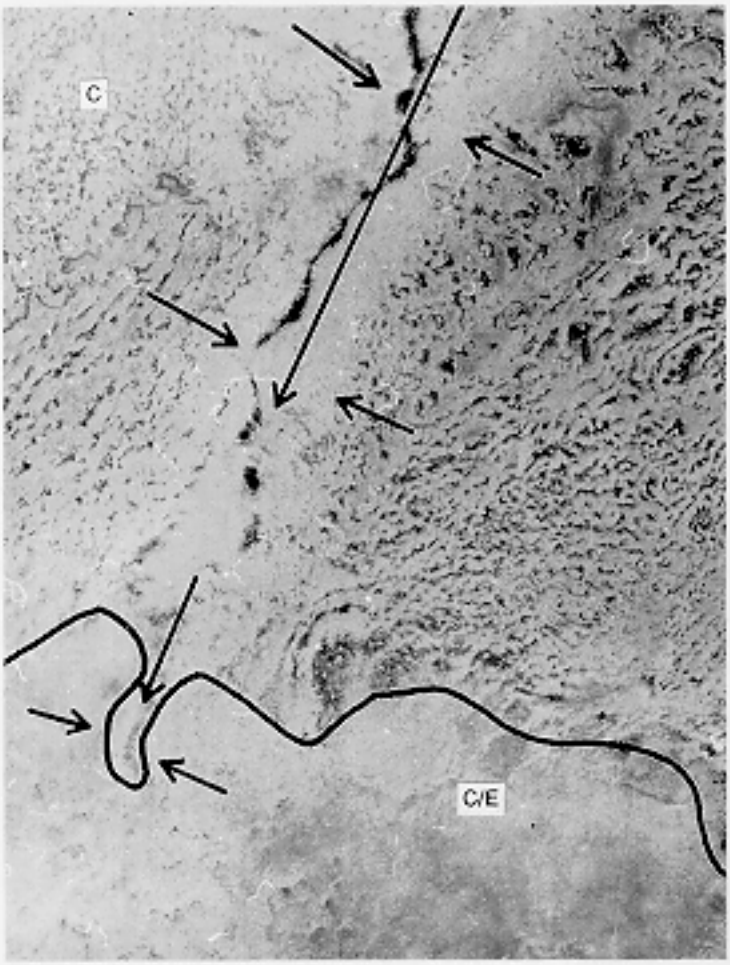
b

Photo II.5
Paysage de plateaux avec une végétation dominée par Euphorbia balsamifera (a) et l'influence des termitières sur le paysage, dans une région apparentée à la photo II.3c (b).

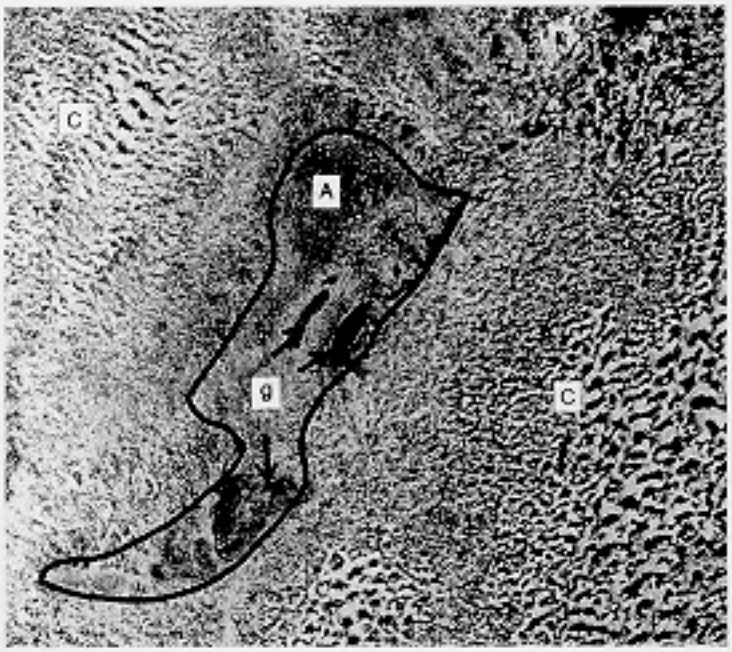
l'influence des termitières sur le paysage, dans une région apparentée à la photo II.3c (b).

Respectivement partie 1, carte en annexe, 350 mm/an, et partie 4, 565 mm/an ; échelles 1 : 11.000 (a), 1 : 37.000 (b).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_7.GIF



a



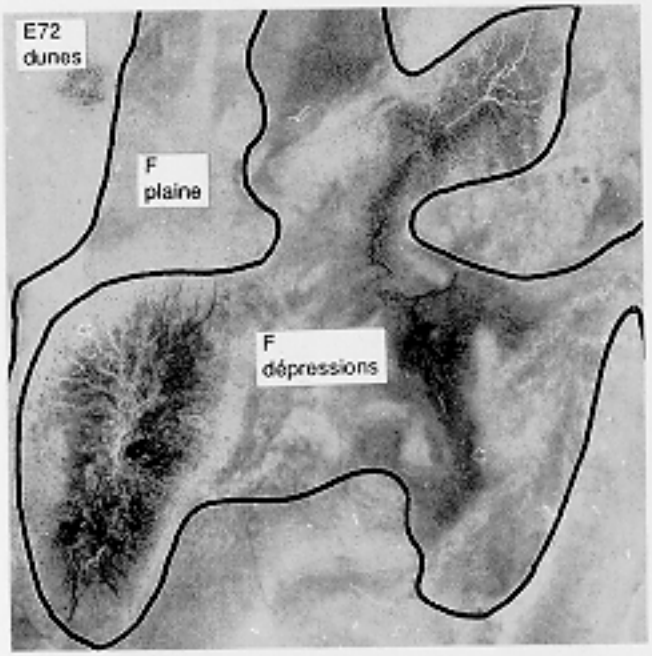
b

Photo II.7
Influence du substrat sur le drainage, illustrée à l'aide d'un drainage disparaissant à partir d'un plateau latéritique dans un ensablement de l'ensemble éolien (a) et à l'aide d'affleurements de grès (g) en altitude, sur un plateau latéritique avec de la brousse tigrée (b).

Les flèches indiquent les pentes descendantes ; respectivement partie 1, carte en annexe, 350 mm/an, et partie 2, 480 mm/an ; échelle 1 : 42 000.

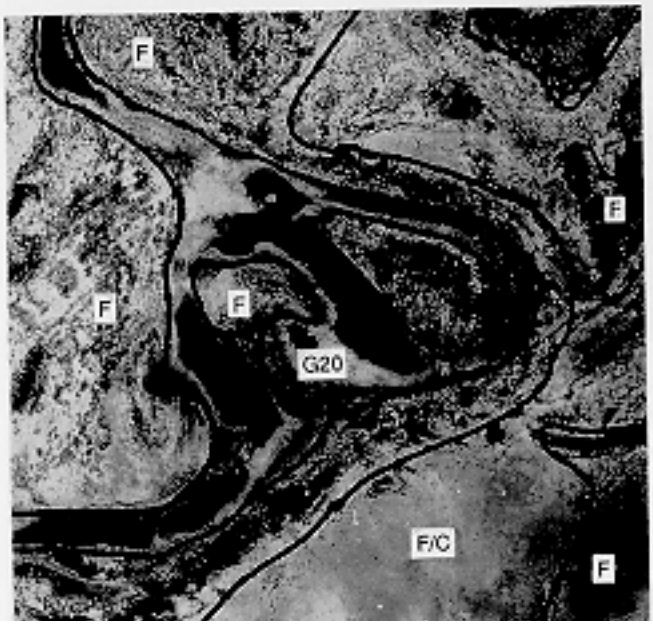
http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2F_7.GIF (1 of 2)26-4-2010 11:23:22

Les flèches indiquent les pentes descendantes ; respectivement partie 1, carte en annexe, 350 mm/an, et partie 3, 480 mm/an ; échelle 1 : 43.000.



a

b



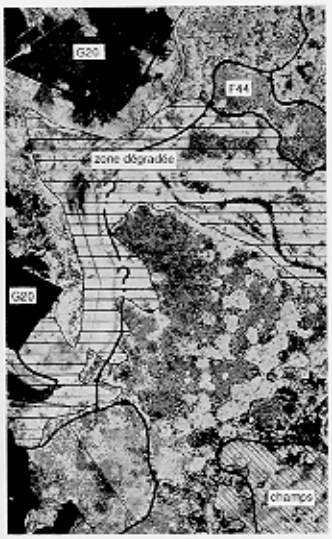
c

Photo II.8
Comparaison de déplacement d'eau sur des petites distances (a et b ; delta mort) et sur de grandes distances (c ; lit fossile alimenté par de l'eau d'irrigation excédentaire).

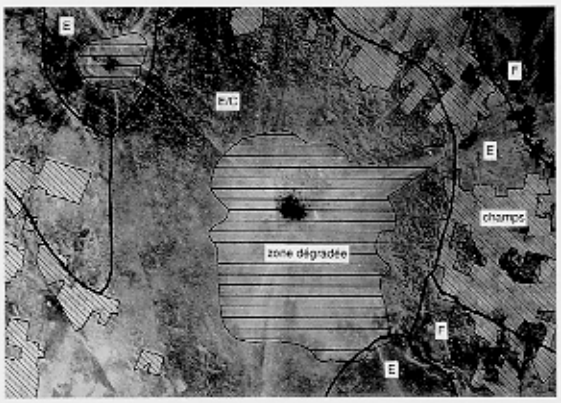
Respectivement partie 2, carte en annexe, 400 mm/an, partie 2, 385 mm/an, et partie 3, 490 mm/an ; échelle 1 : 53.000.

F

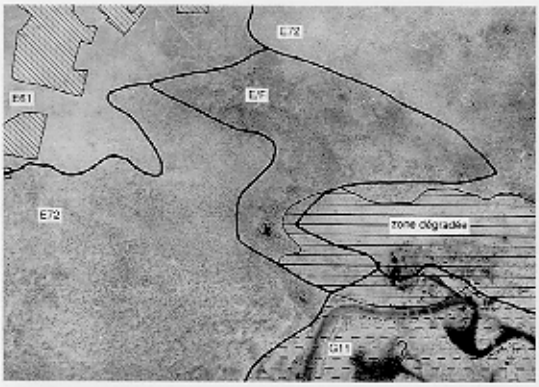
a



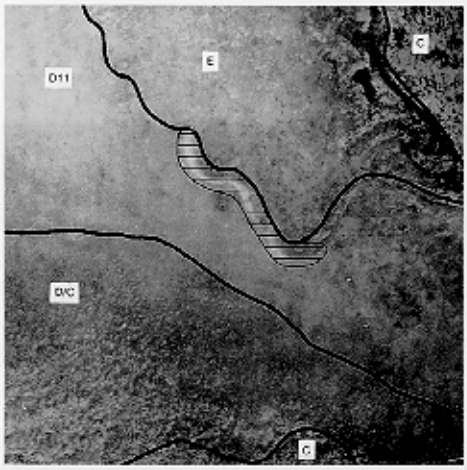
b



c



d



e

Photo II.9
Végétation naturelle, champs et jachères d'âges différents dans le delta mort (a), champs et dégradation des pâturages dans un paysage principalement argilo-limoneux (b) et limo-sablonneux (c), champs et signes de dégradation autour de Léré (d), plateau latéritique et dune à crête à sable vif pour une pluviosité moyenne annuelle de 300 mm (e).

II. EVALUATION DE LA PRODUCTION DES PATURAGES

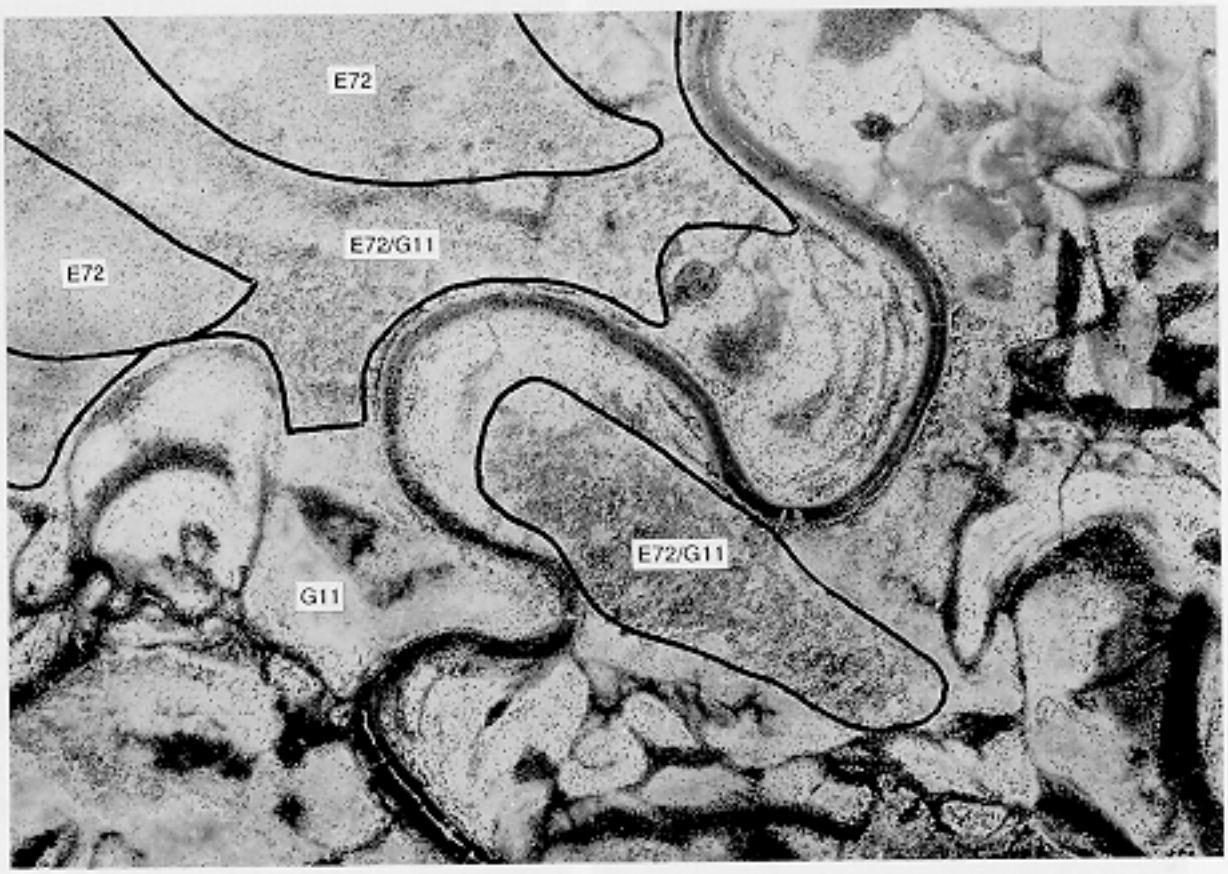


Photo II.10
Transition complexe (E72/G11) de l'ensemble éolien vers l'ensemble fluviatile.

Partie 1, carte en annexe, 360 mm/an ; échelle 1 : 43.000.

L'importance des pâturages de la savane augmente de plus en plus, même pour l'élevage de zébus, à cause de la sécheresse et la pression démographique.

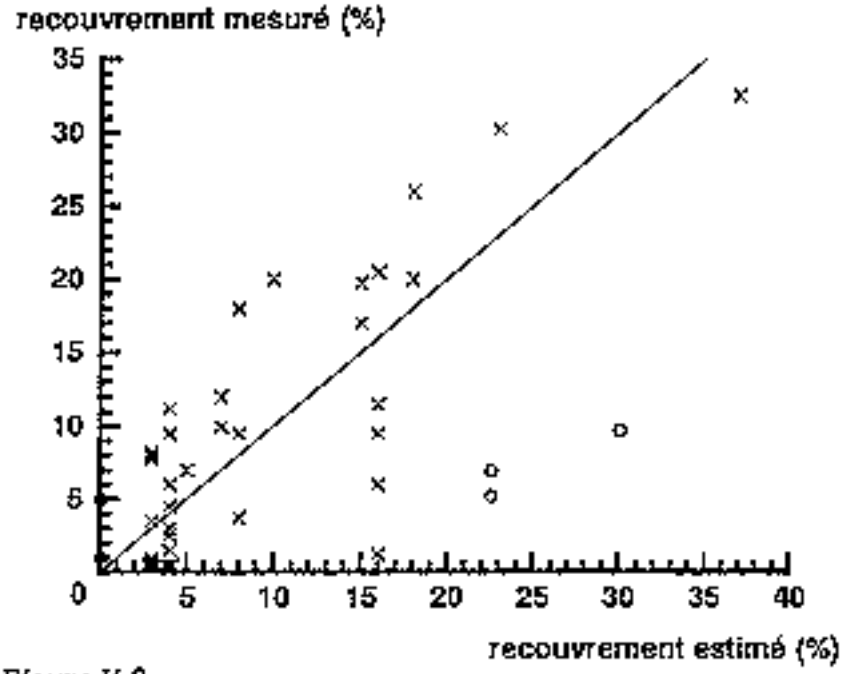


Figure II.8
Taux de recouvrement mesuré de toutes les espèces ligneuses en tant que fonction du taux de recouvrement estimé pour les unités de paysage de la partie 3 de la carte (annexe).

o : sites inondés ; × ; autres unités ; —— : mesure = estimation.

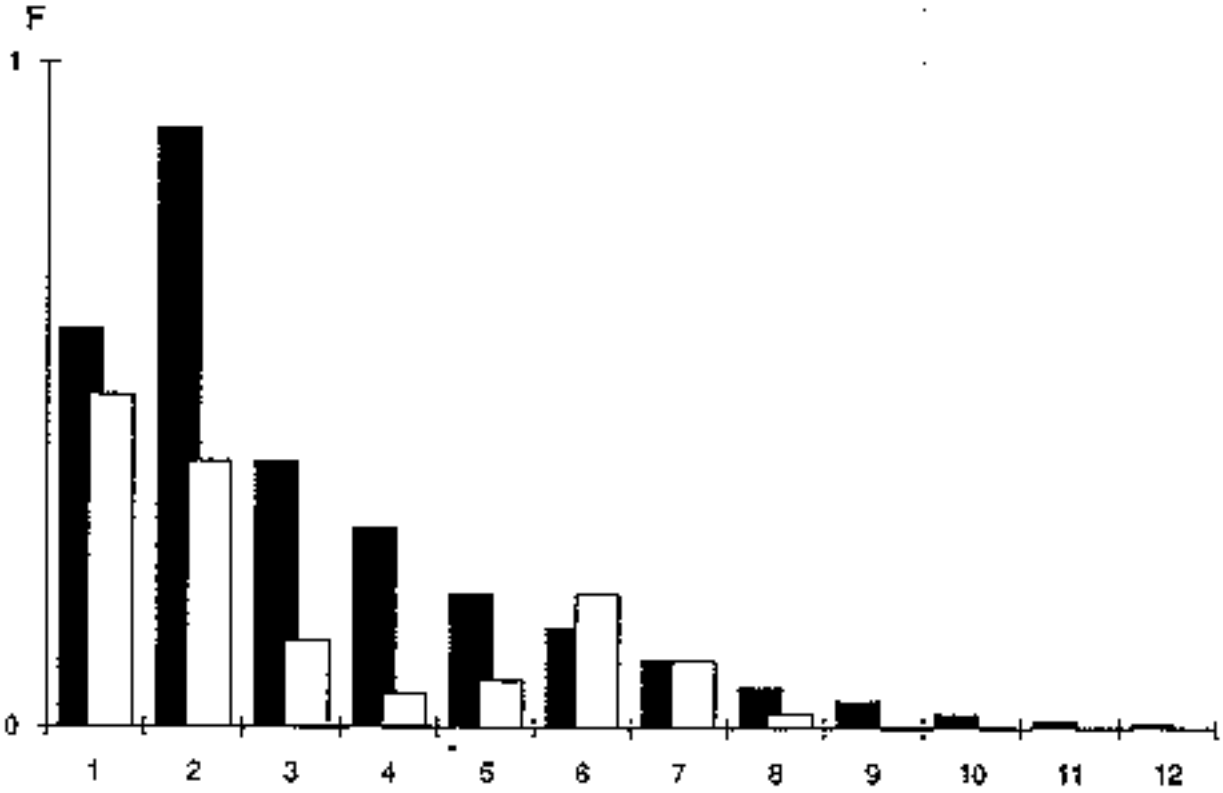


Figure II.9
Répartition des fréquences (F = fraction du nombre total d'observations) des taux de recouvrement de toutes les espèces ligneuses réparties en catégories de grandeur (1 à 12) d'une population non ou peu perturbée (■) et d'une population perturbée (❑).

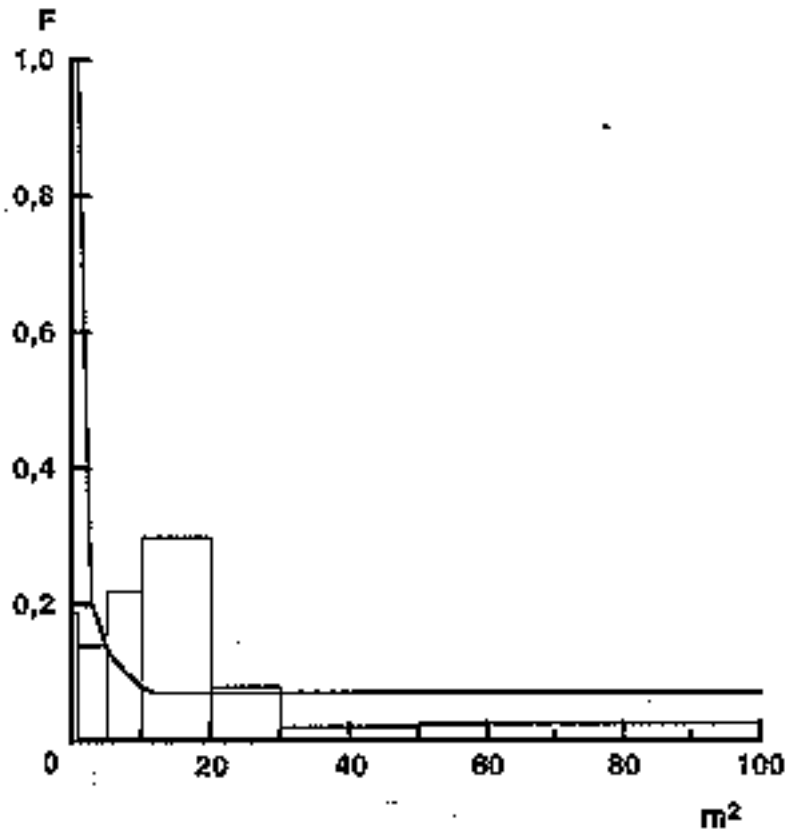


Figure II.10
Répartition des fréquences (F = fraction du nombre total d'observations) de taux de recouvrement d'Acacia seyal, répartie en catégories de grandeur (Ranch de Niono, 1979, substrats sablonneux) et relation entre la fraction de feuillage et de rameaux en dessous de 2 m de hauteur avec des catégories de taux de recouvrement de même espèce.

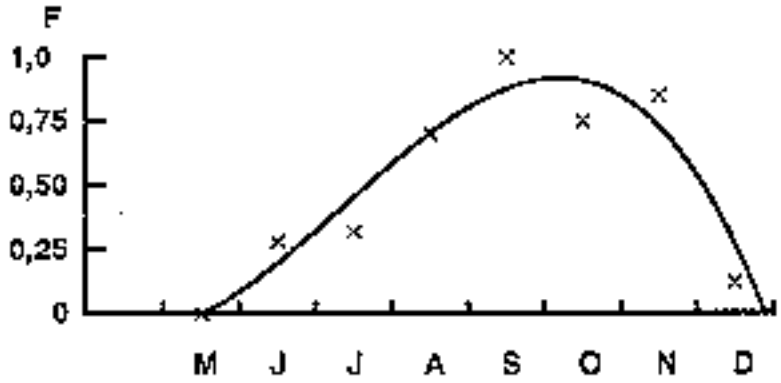


Figure II.11
Développement de la biomasse des feuilles d'Acacia seyal au cours des saisons en tant que fraction (F) de la biomasse maximum atteinte (Ranch de Ntono, 1977).

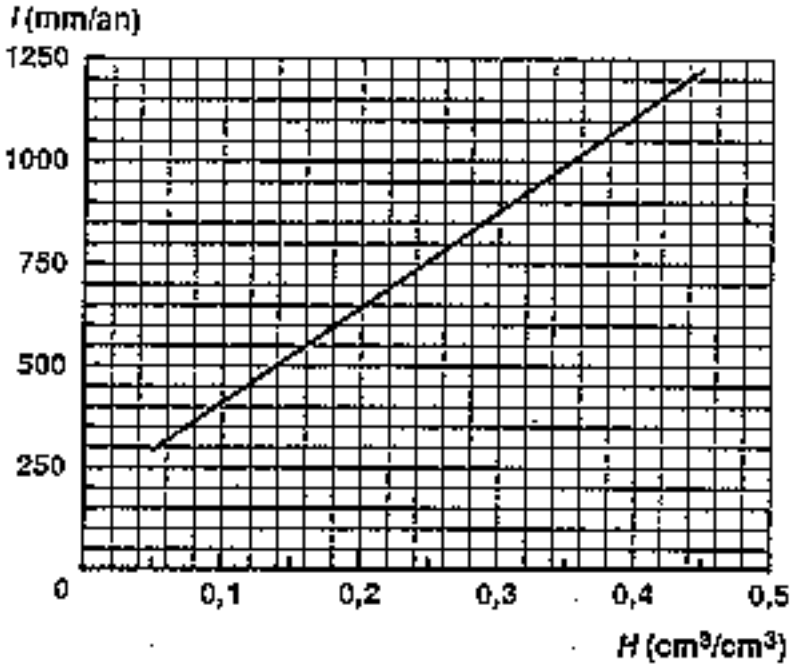


Figure II.12
La quantité d'eau qui tout juste humidifie les deux premiers mètres du profil de sol jusqu'à la capacité au champ, sans être accompagnée de percolation, en rapport avec le taux d'humidité à la capacité au champ (à pF 2,5 ; H).

$I = 2340 \times H + 172.$

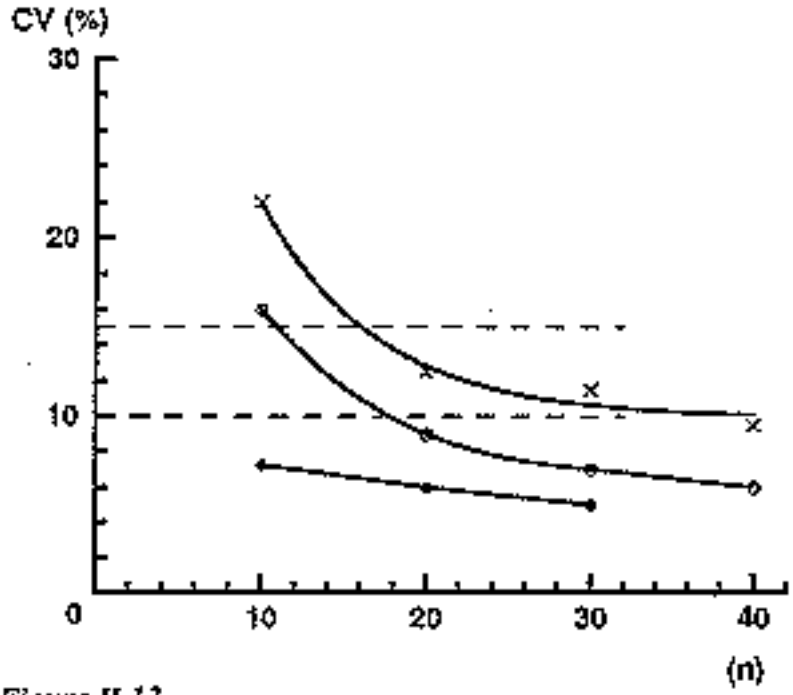


Figure II.13
Coefficient de variation de la biomasse moyenne (CV ; %) en relation avec le nombre de répétitions (n) pour des végétations homogènes (bas-fond ; •), des végétations hétérogènes (glacis ; ×) et des végétations intermédiaires (dunes ; ○).

Selon Grouzis, 1987.

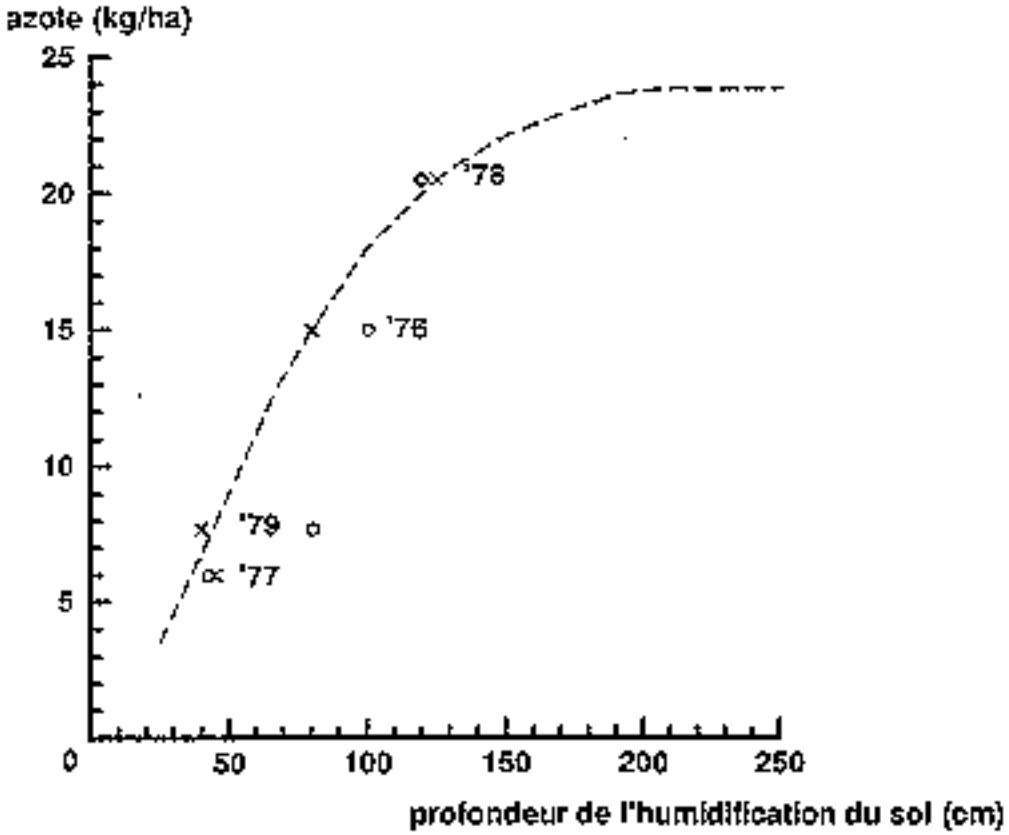


Figure II.14
Le rendement d'azote (standardisé pour les légumineuses ; N_1) sur un site sablo-limoneux pendant quatre années sèches consécutives en tant que fonction de la profondeur de l'humidification. La profondeur d'humidification est calculée en tenant compte (×) et en ne tenant pas compte (○) de la répartition des pluies au cours des années concernées.

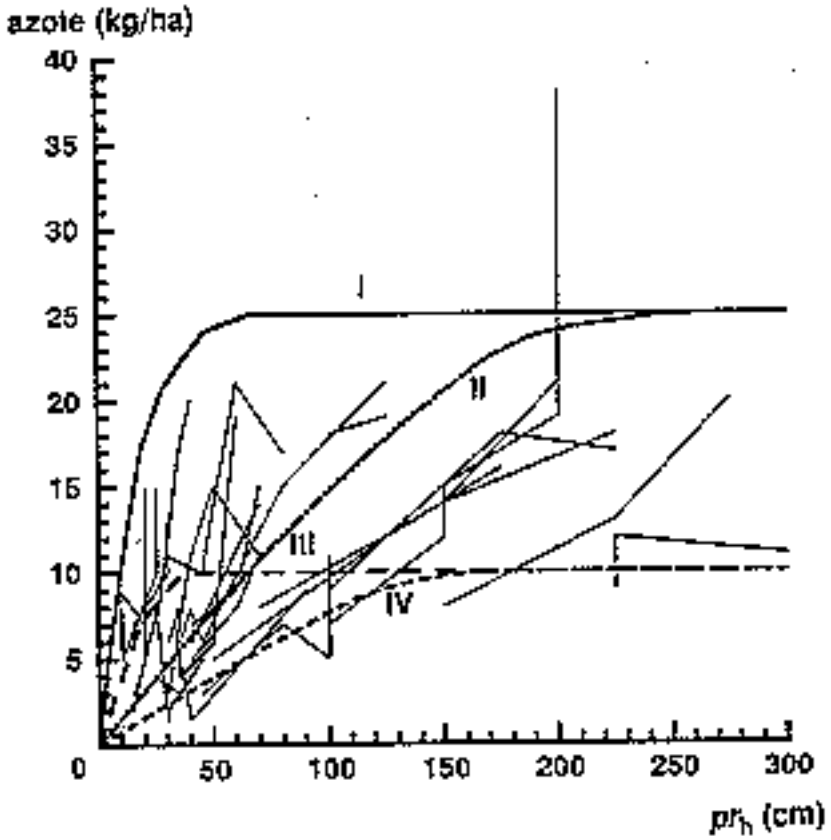


Figure III.9
Variations de la quantité mesurée d'azote dans la biomasse aérienne, sur 30 sites d'un trajet nord-sud au Mali pendant quatre années successives (normalisées selon 5 % de légumineuses). Ces variations sont représentées par rapport à la profondeur simulée d'humidification (pr_h) du profil. Le tout sur l'arrière-fond du rapport théorique entre l'adsorption d'azote lors de la floraison et la profondeur d'humidification du profil, dans le cas de différentes quantités de matière organique et de répartition dans le profil.

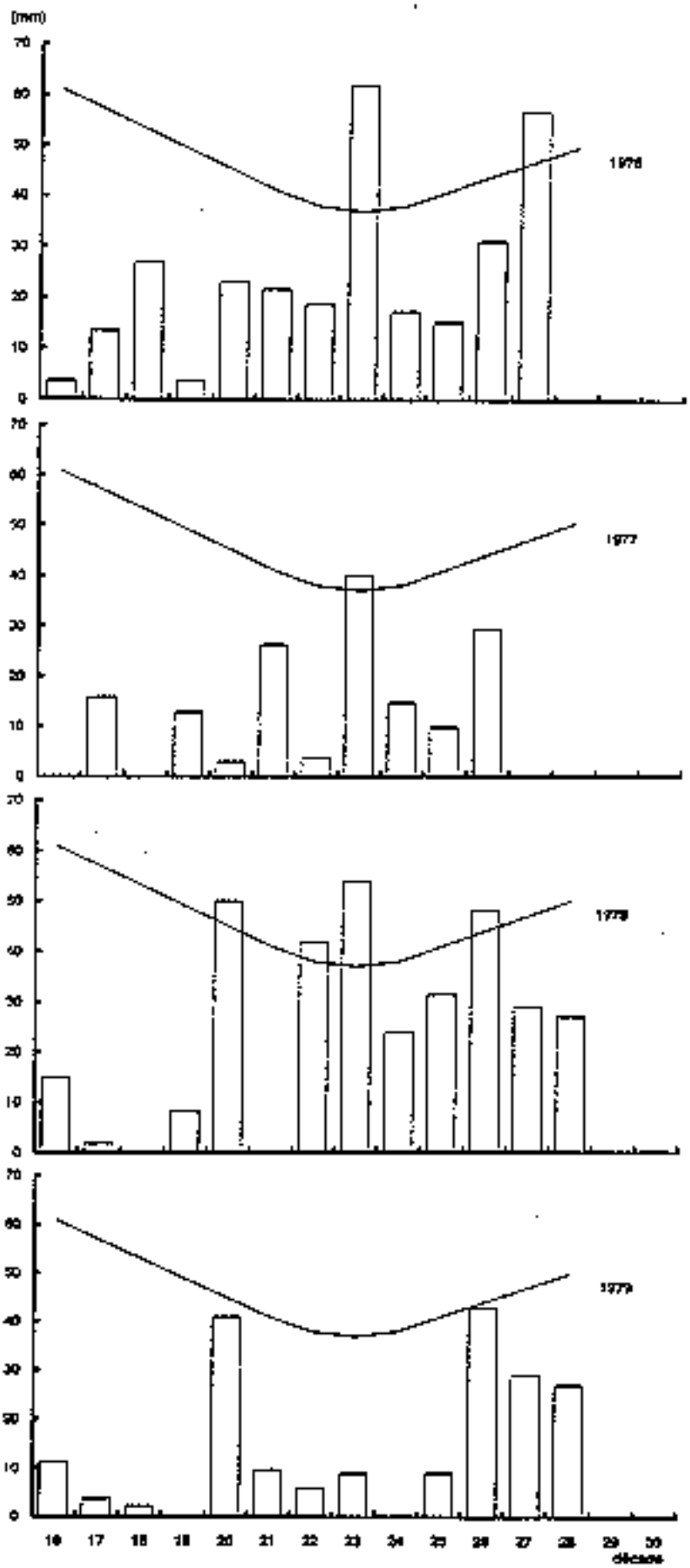


Figure II.15
l du site 16 par décade, sur quatre années consécutives, et évapotranspiration potentielle
moyenne

l du site 16 par décade, sur quatre années consécutives, et évapotranspiration potentielle moyenne.

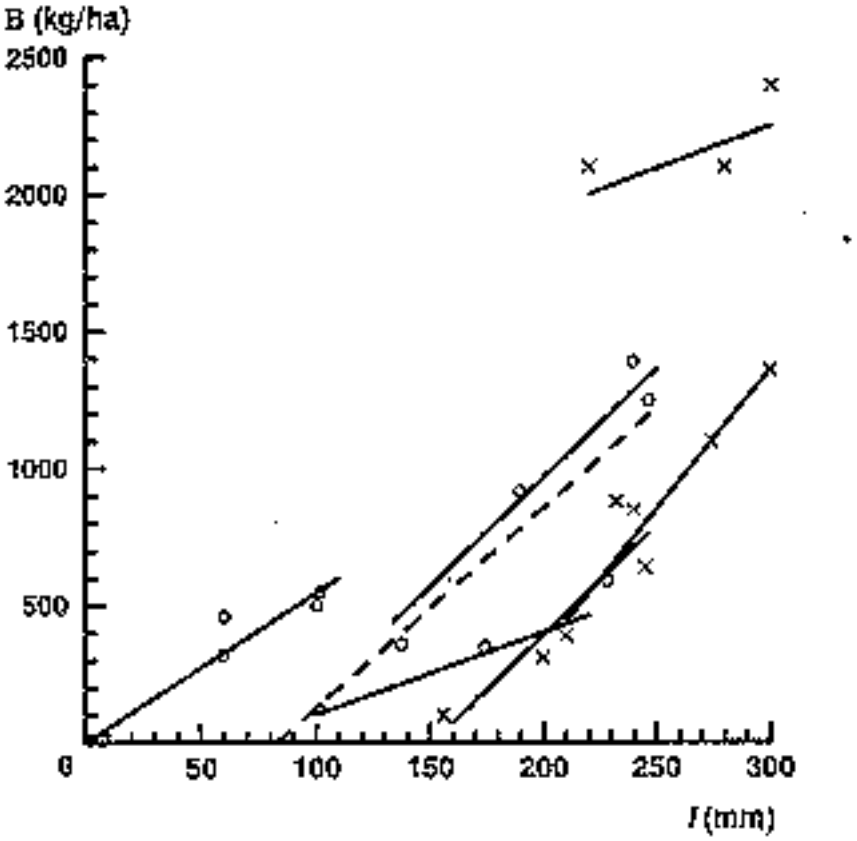
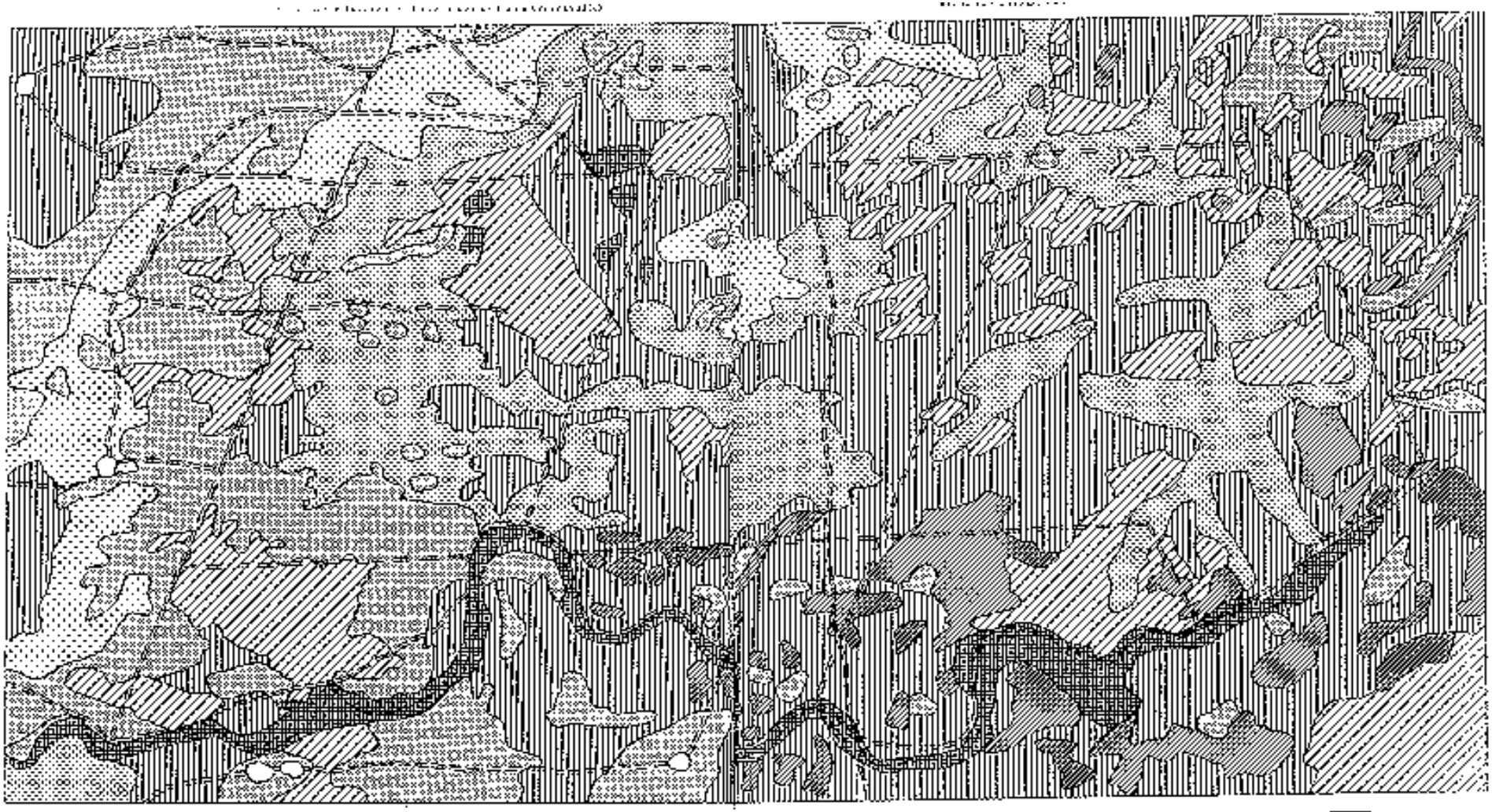


Figure III.6
Rapport théorique moyen (------) entre la production annuelle de la strate herbacée (B ; matière sèche) et la quantité d'eau infiltrée (I) comparé avec des productions mesurées (———), pendant 3 années successives pour différentes quantités d'eau infiltrée, sur des sites à sols profonds. Les mesures ont été exécutées sur quatre sites dominés par Cenchrus biflorus (○) et sur trois sites dominés par Schoenefeldia gracilis (×).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2C_4.GIF



Carte II.4
Unités de paysage du Rauch Niamo.

Voir II.4.2 et carte « Annexe » pour la caractérisation des unités différenciées.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN2C_4.GIF26-4-2010 11:23:35

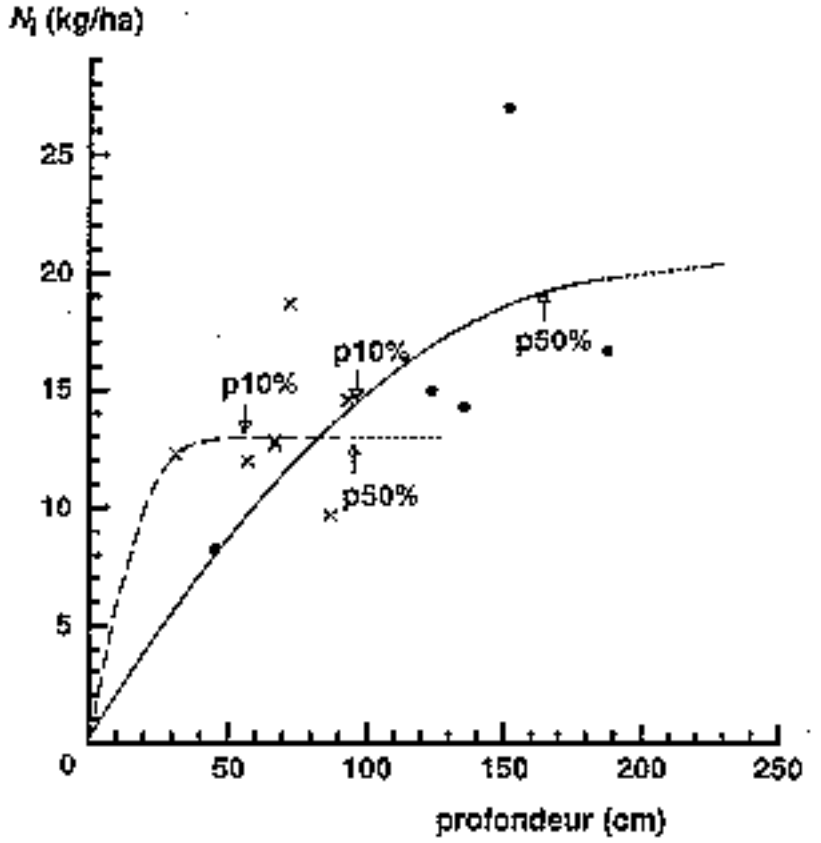


Figure II.16
Rapport entre le rendement d'azote (standardisé pour les légumineuses ; N_i) de la strate herbacée, et la profondeur maximum d'humidification du sol, pour deux unités du Ranch de Niono. Le rendement d'azote est mentionné par des flèches pour une année moyenne (p50%) et pour une année sèche (p10%).

×: F42 ; •: F33.

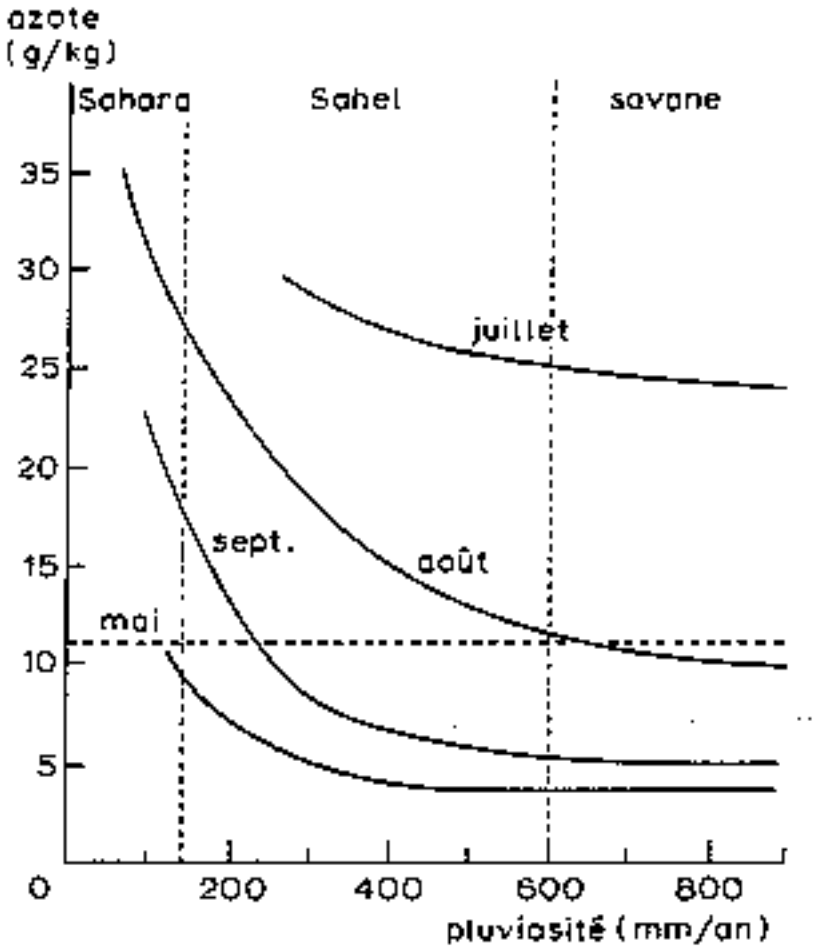


Figure II.17
Taux d'azote moyen de la biomasse aérienne de la strate herbacée, en tant que fonction de la pluviosité annuelle au cours de divers mois de l'année.

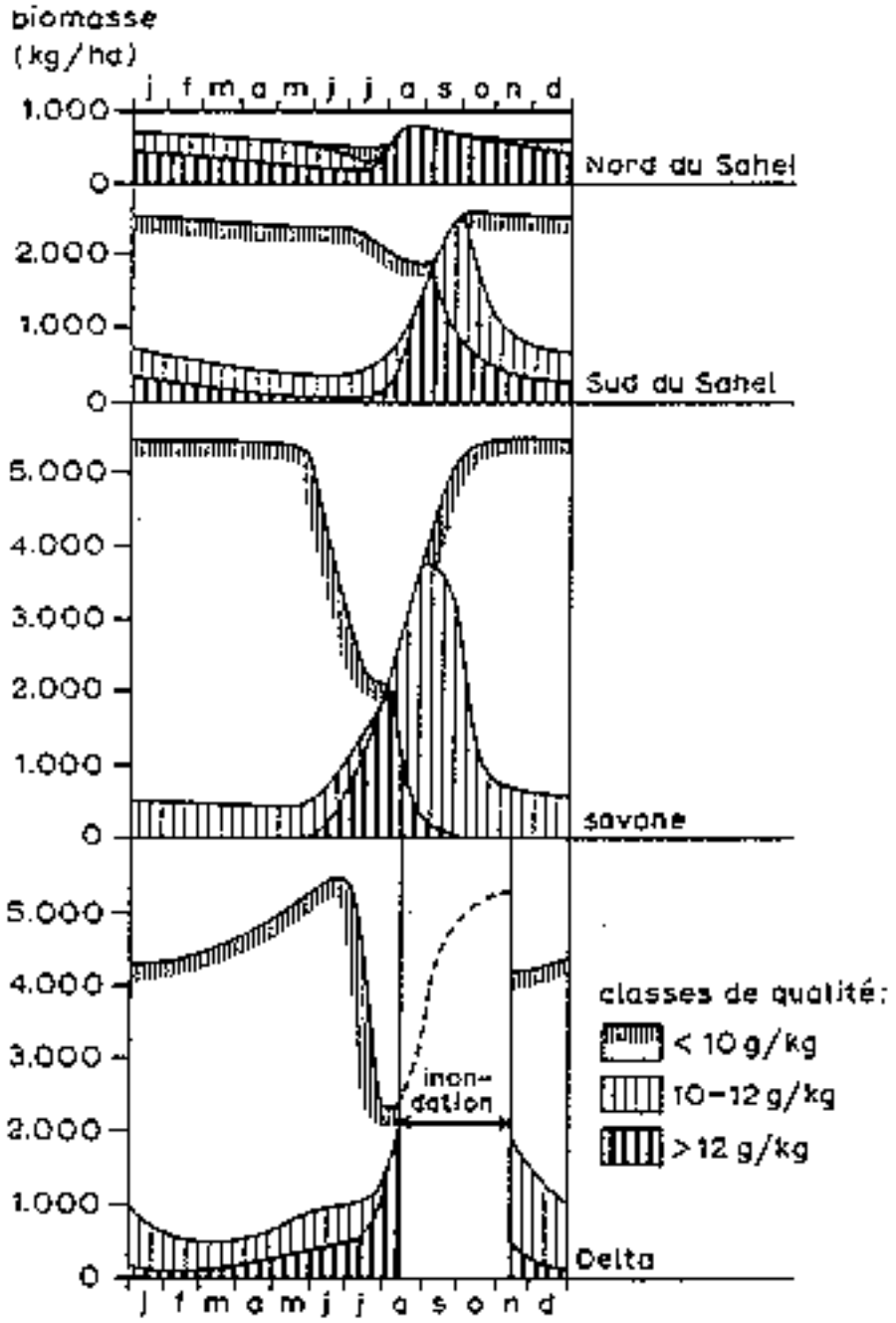


Figure II.18
Evolution annuelle de la biomasse par catégorie de qualité de fourrage (taux d'azote en g/kg), en l'absence de feux et de broutage, pour quatre zones de pâturages.

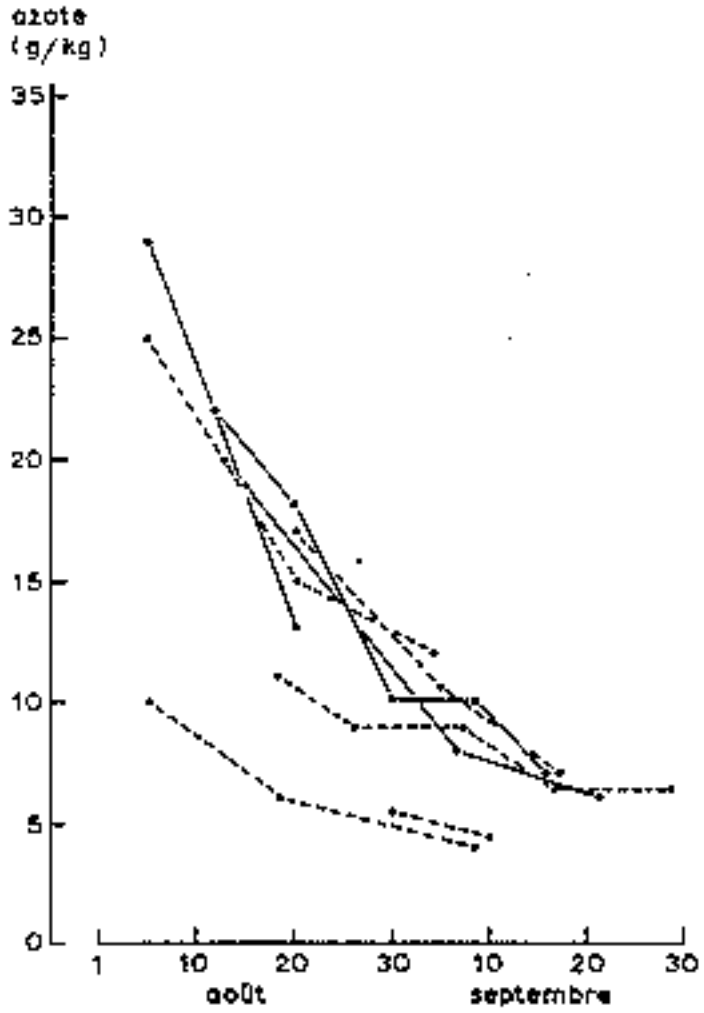


Figure II.19
Evolution du taux d'azote de la biomasse aérienne pour les pâturages (sans fertilisation) des unités F20 (____) et F42 (----) du Ranch, au cours de la saison des pluies.

Selon Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 200.

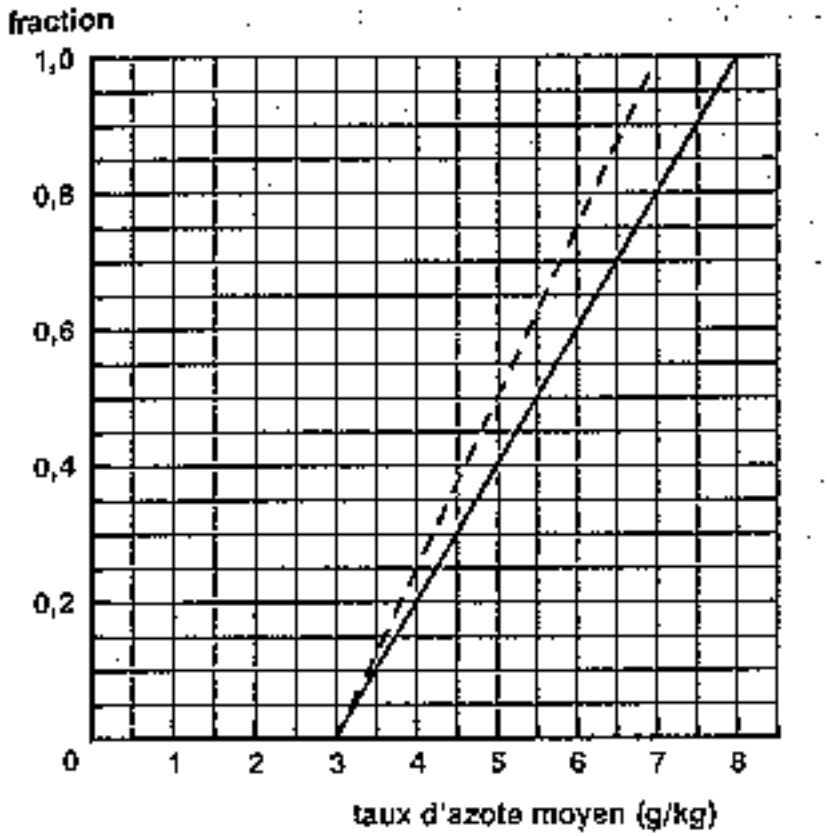


Figure II.20
Fractions supérieures de la biomasse qui pour un taux d'azote moyen donné, répondent à la norme de 7 g/kg (---) ou 8 g/kg (——).

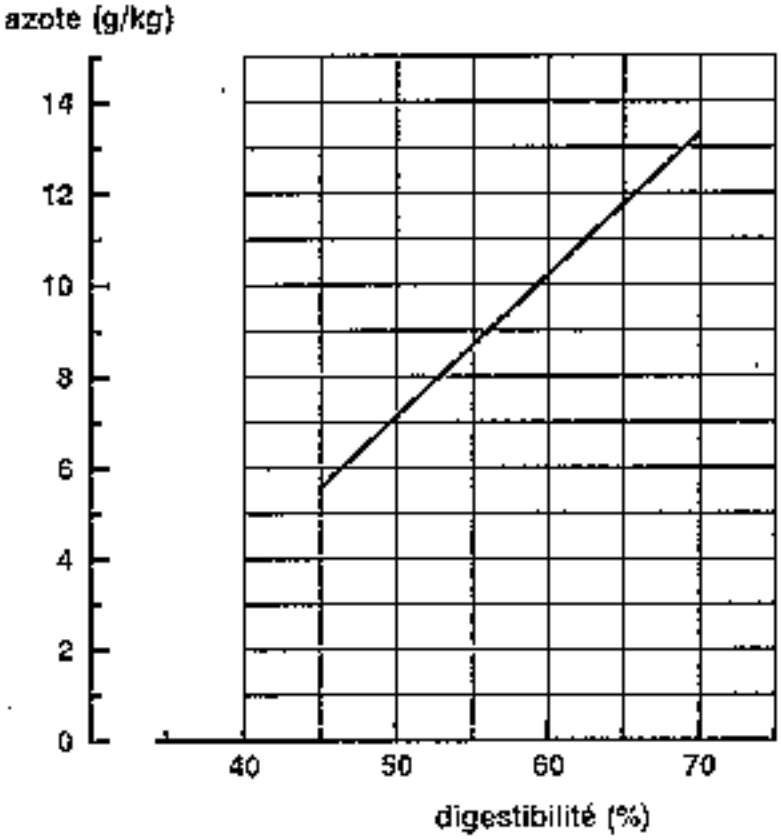


Figure II.21
Valeurs limites pour le taux d'azote dans le fourrage grossier, en-dessous desquelles l'ajout d'urée augmente l'ingestion. Ces valeurs sont présentées en tant que fonction de la digestibilité de la matière sèche.

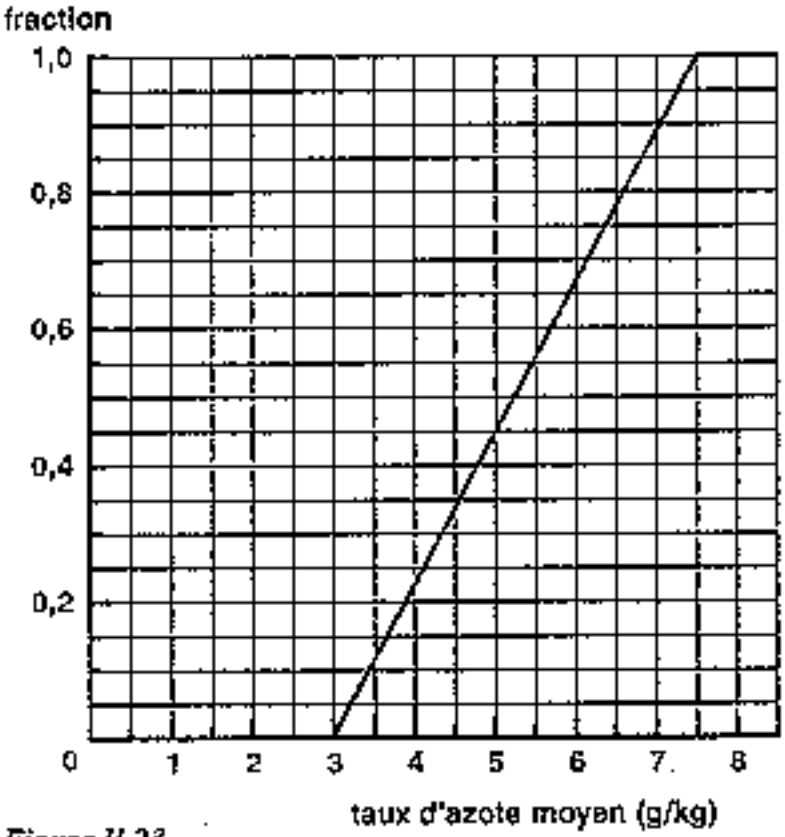


Figure II.23
Fraction supérieure avec un taux d'azote moyen de 7,5 g/kg, par rapport au taux d'azote moyen de la biomasse.

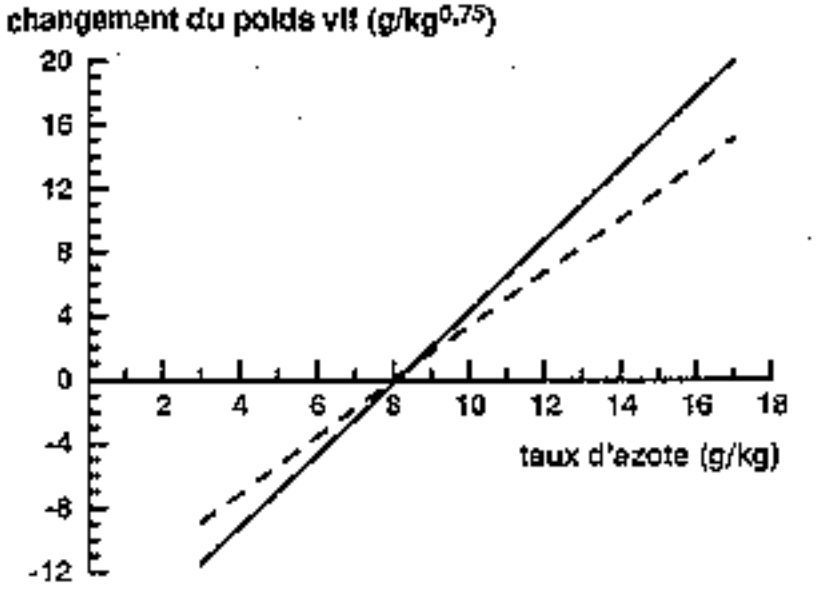


Figure III.24
Rapport mesuré (——) entre les modifications journalières de poids (ΔPV) et le taux d'azote du fourrage [N] pour des bovins sur des pâturages naturels en Australie, comparé au rapport obtenu par déduction (-----) pour des bovins sur le pâturage naturel moyen (tableau III.13) dans les pays sahéliens.

Rapport mesuré suivant Hendricksen *et al.*, 1982 ; rapport déduit : $\Delta PV = 1{,}63\ [N] - 12{,}6$ pour $[N] \geq 8$ et $\Delta PV = 1{,}89\ [N] - 14{,}6$ pour $[N] \leq 8$.

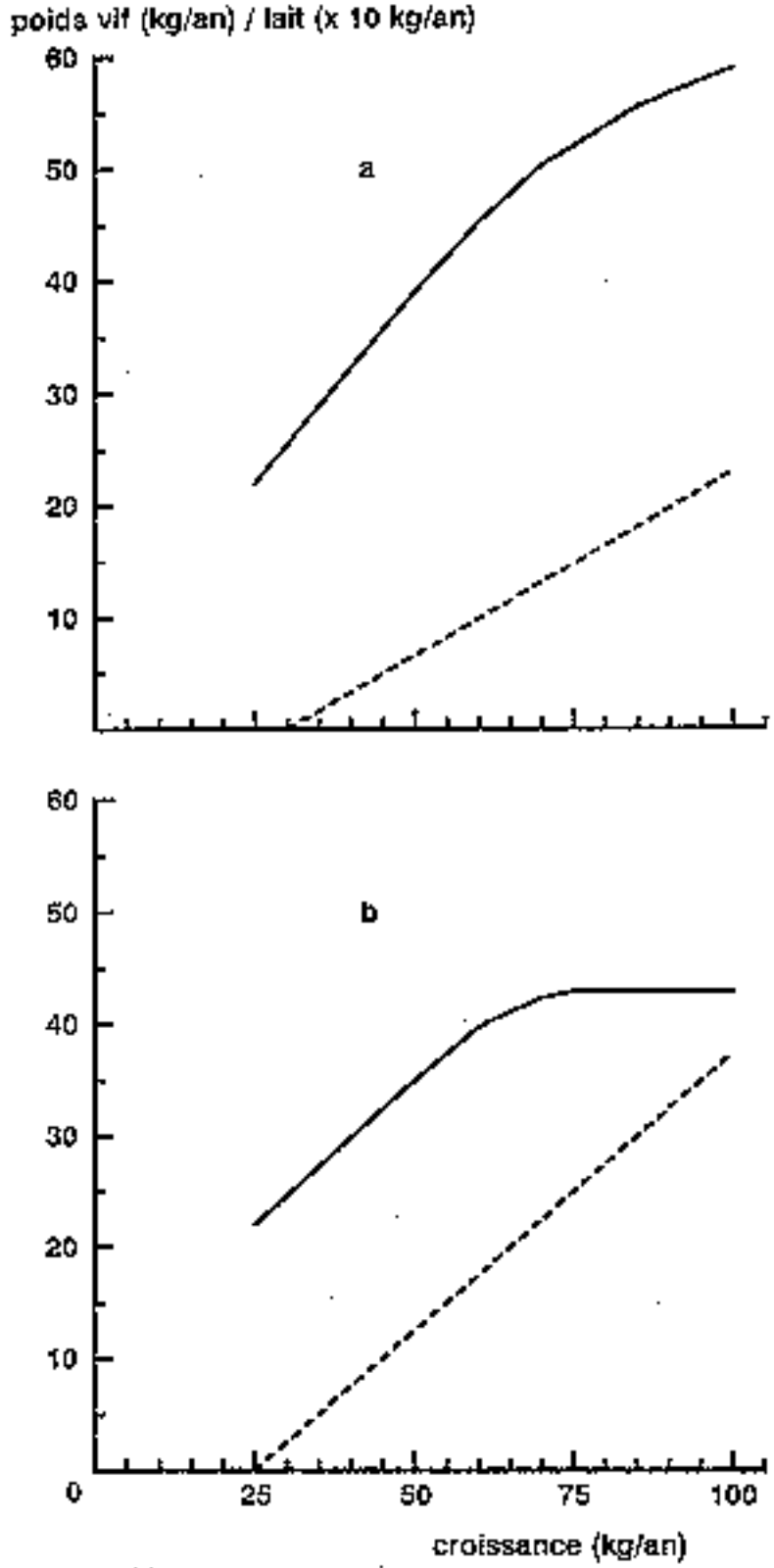


Figure II.22
Production moyenne de lait (-----) et de poids vif (———) par animal, pour un troupeau géré de manière à obtenir une production maximale de viande (a) ou de lait (b). Cette production est présentée par rapport à la situation fourragère, étant exprimée par la croissance annuelle nette d'une génisse d'un poids de départ de 150 kg.

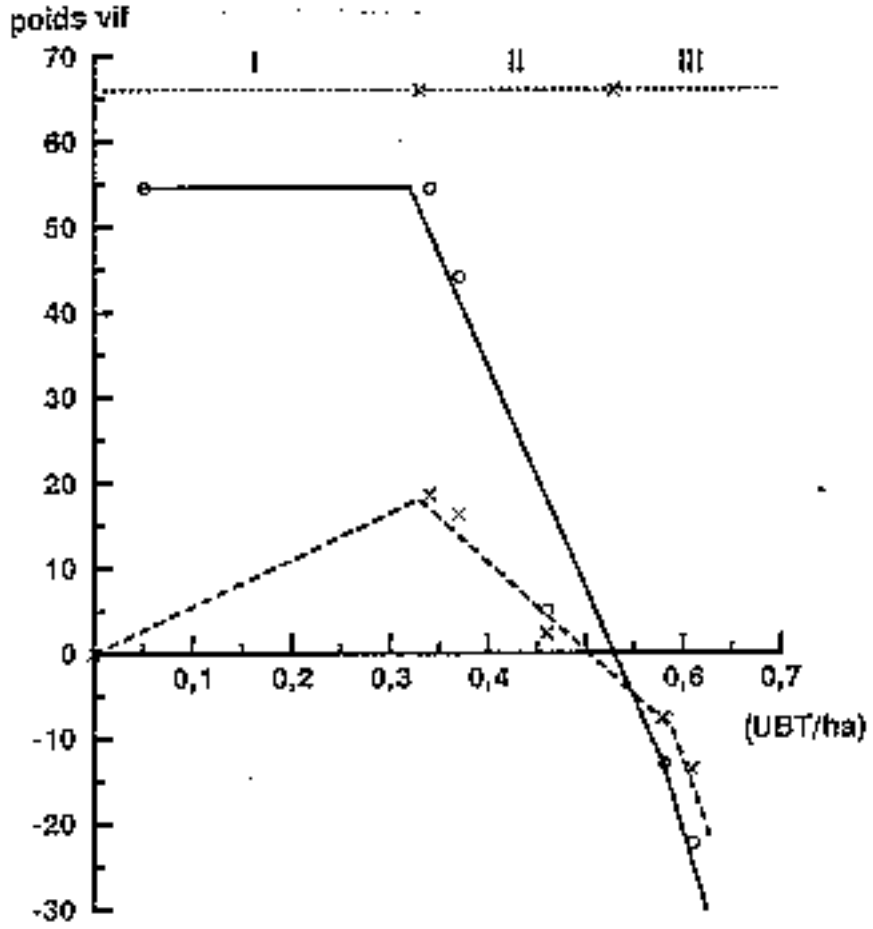


Figure II.24
Production bovine en tant que fonction de l'occupation des pâturages (UBT/ha) ; résultats des calculs pour une année moyenne dans le sud du Sahel ; voir le texte pour les explications des trajets I, II et III.

o : kg/UBT par an ; × : kg/ha par an.

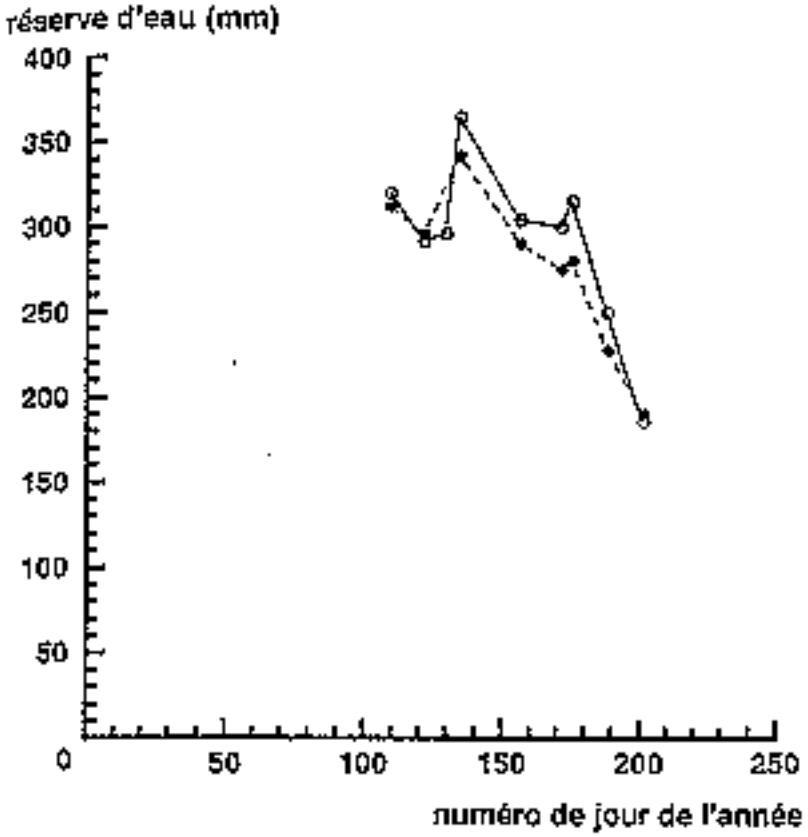


Figure III.1
Réserve d'eau mesurée (○——○) et simulée (●- - -●) dans le profil du sol (0-180 cm) au cours de la saison des pluies 1971/72 à Migda (Israël).

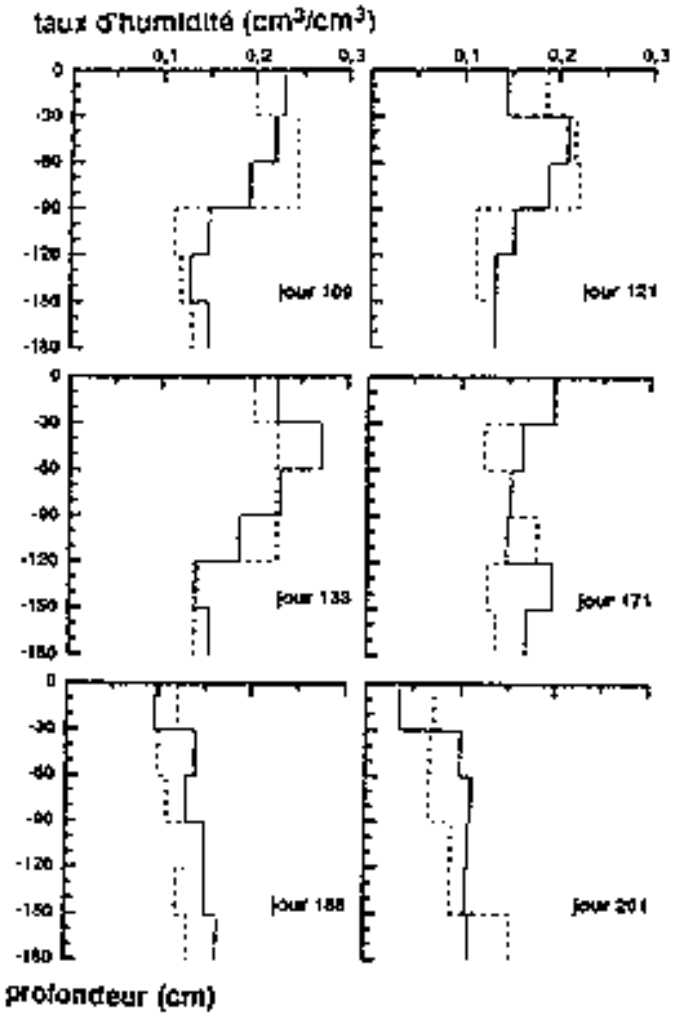


Figure III.2
Taux d'humidité mesuré (———) et simulé (- - - - -) dans le profil du sol (0-180 cm) au cours de 6 jours pendant la saison des pluies 1971/72 à Migda (Israël).

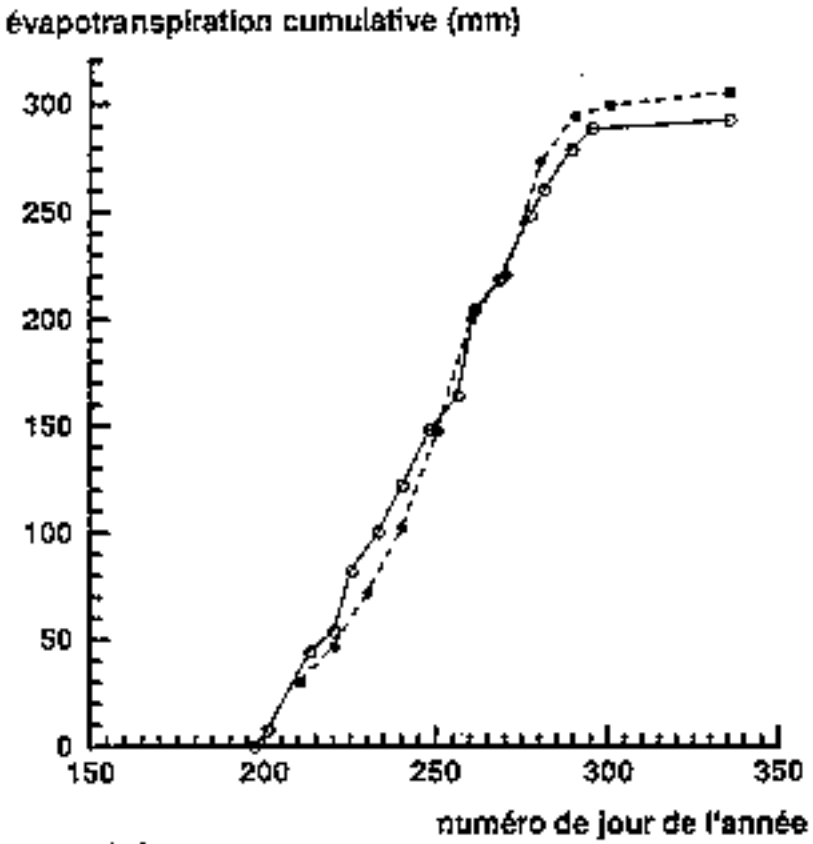


Figure III.3
Evaporation cumulative mesurée (o——o) et simulée (•---•), en 1968 à Bambey (Sénégal).

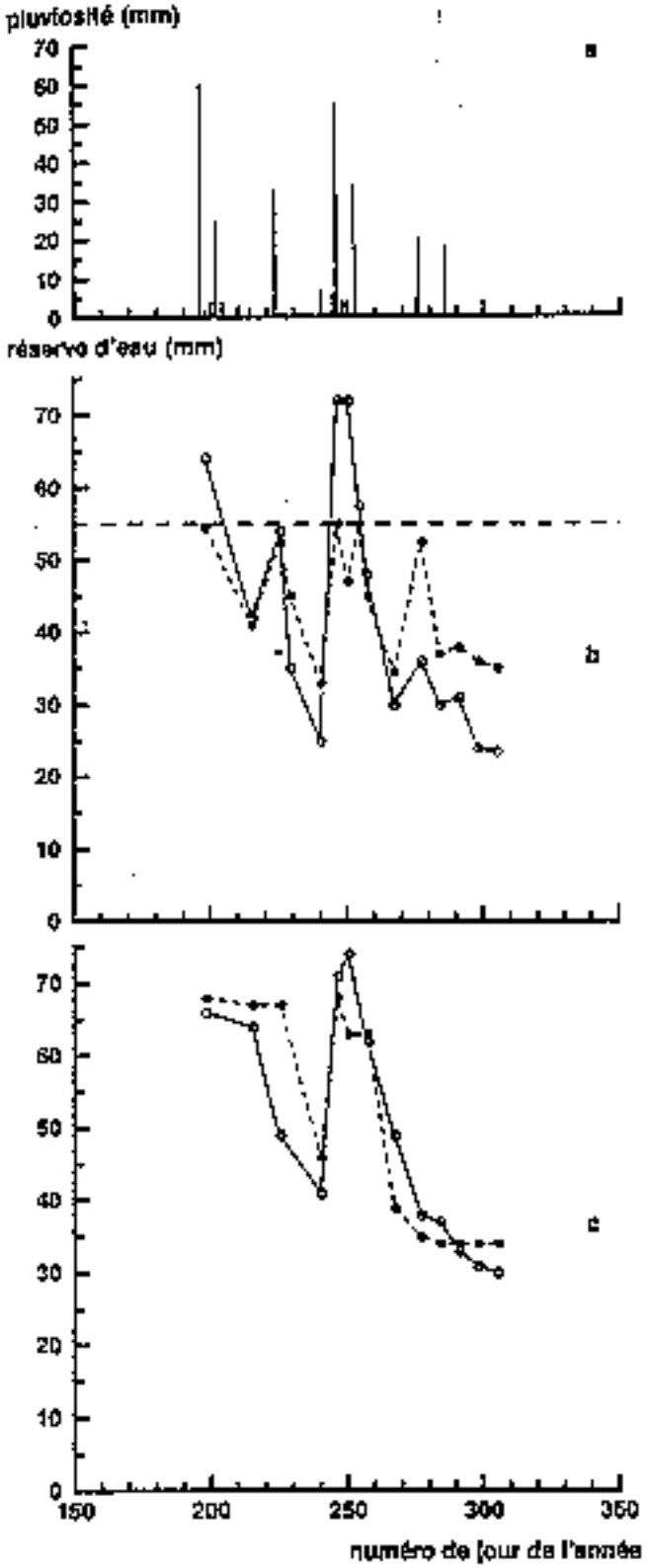


Figure III.4
Pluviosité en 1968 à Bambey (Sénégal ; a) et réserve d'eau mesurée (o——o) et simulée (•- - -•) dans la couche du sol de 0 à 50 cm (b), et de 50 à 100 cm (c).

—·——: capacité au champ.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN3_5.GIF

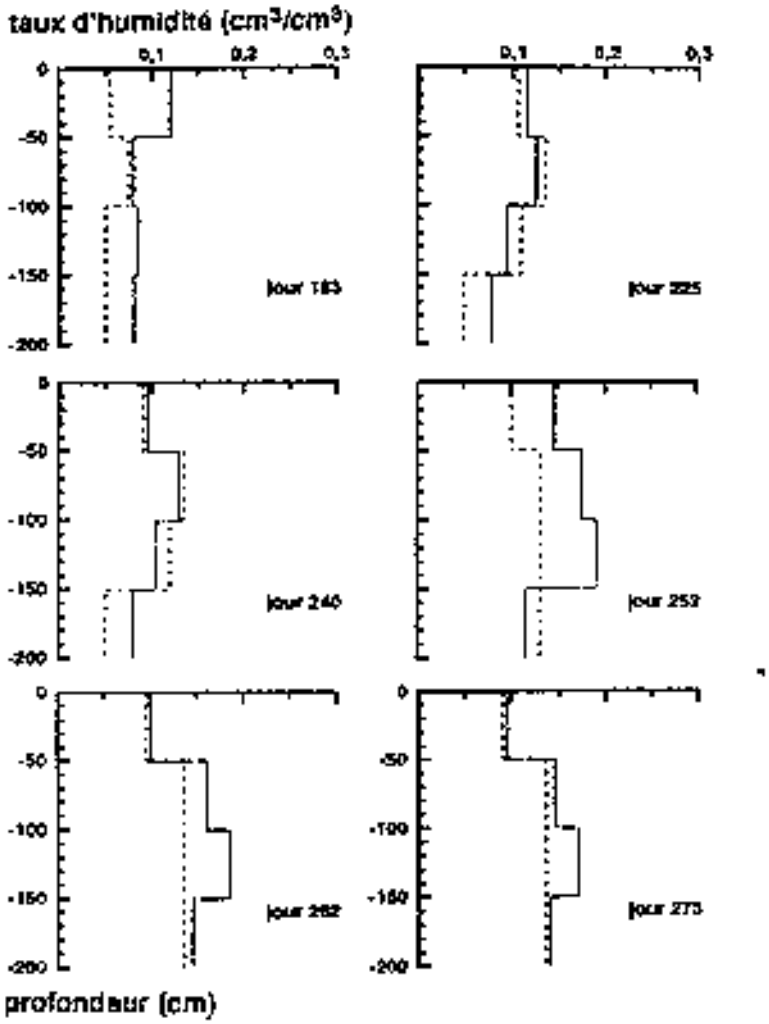


Figure III.5
Taux d'humidité mesuré (———) et simulé (- - - - -) dans le profil du sol (0-200 cm) au cours de 6 jours pendant la saison des pluies 1968 à Bambey (Sénégal).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN3_5.GIF26-4-2010 11:23:39

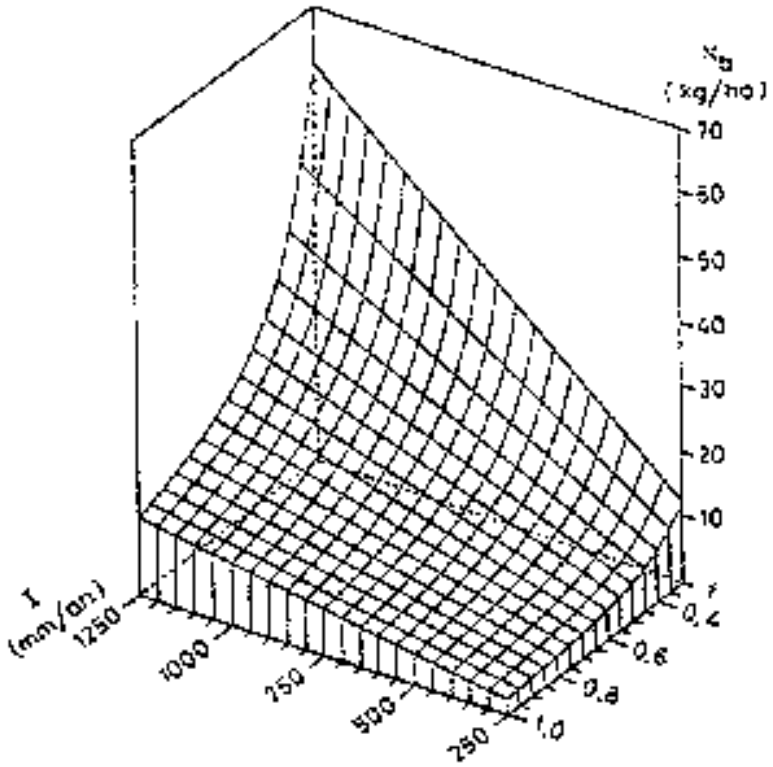


Figure III.7
Rapport entre N_b, la quantité d'eau infiltrée et la fraction de N_b perdue annuellement (f).

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN3_8.GIF

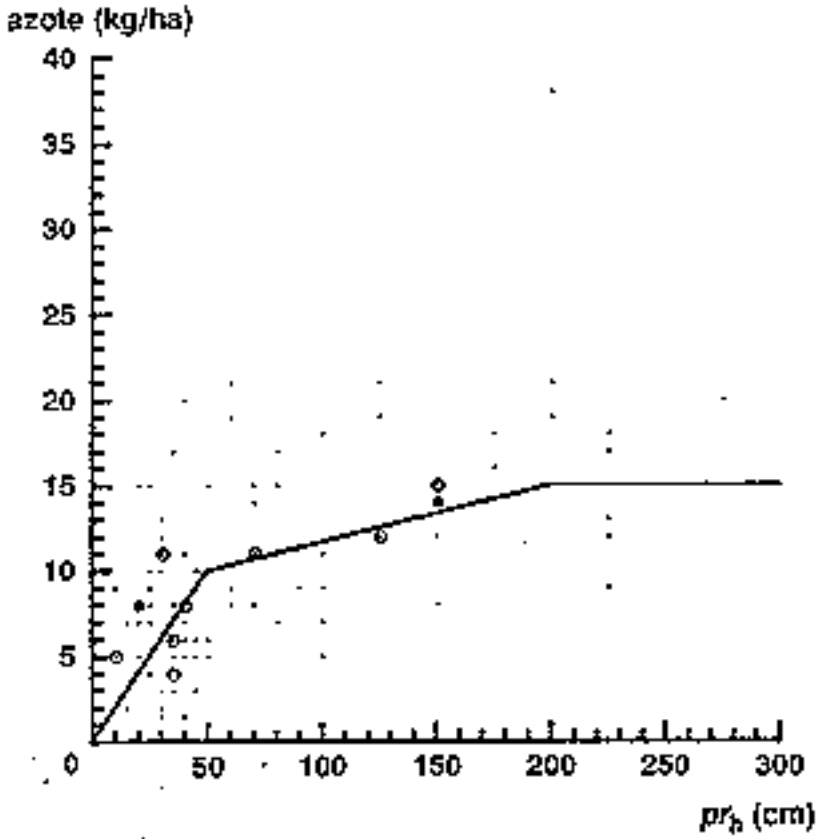


Figure III.8
Quantité mesurée d'azote dans la biomasse aérienne de 30 sites sur un trajet nord-sud au Mali pendant 4 années successives (normalisée selon 5 % de légumineuses) et récolte moyenne d'azote, par rapport à la profondeur simulée d'humidification (pr_h) du profil.

o 2 observations ; • 3 observations.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN3_8.GIF26-4-2010 11:23:39

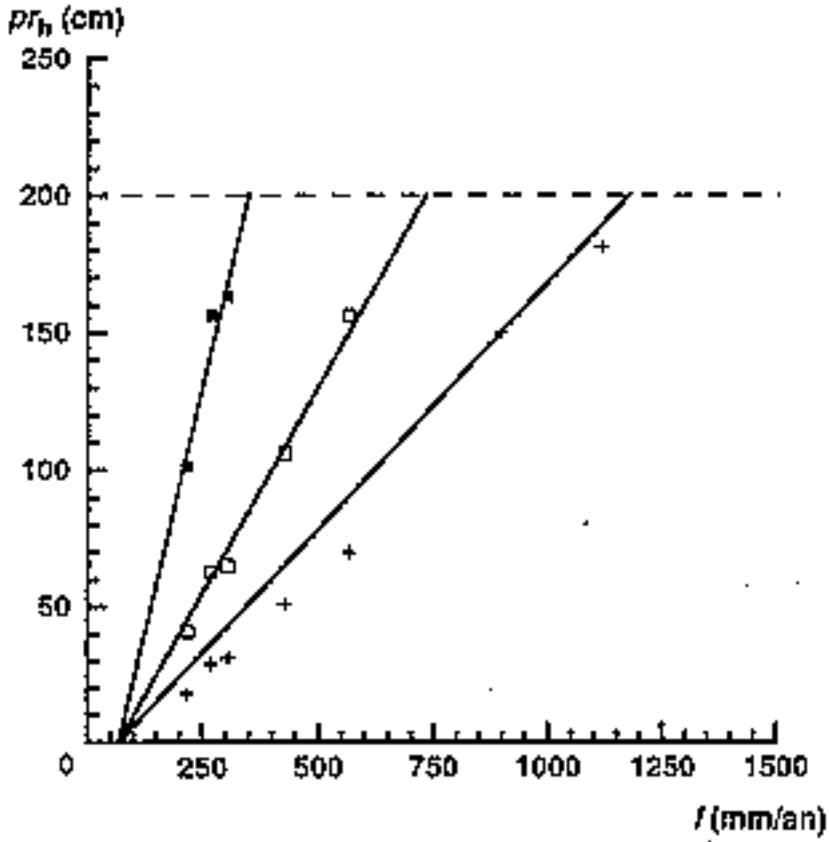


Figure III.10
Profondeur d'humidification du profil (pr_h) par rapport à la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour des types de sol dont le taux d'humidité varie (cm^3/cm^3) à la capacité au champ (pF2,5) et au point de flétrissement (pF4,2).

■ θ à pF2,5 : 0,075 cm^3/cm^3, θ à pF4,2 : 0,025 cm^3/cm^3 ; ○ θ à pF2,5 : 0,20 cm^3/cm^3, θ à pF4,2 : 0,10 cm^3/cm^3 ; + θ à pF2,5 : 0,45 cm^3/cm^3, θ à pF4,2 : 0,20 cm^3/cm^3.

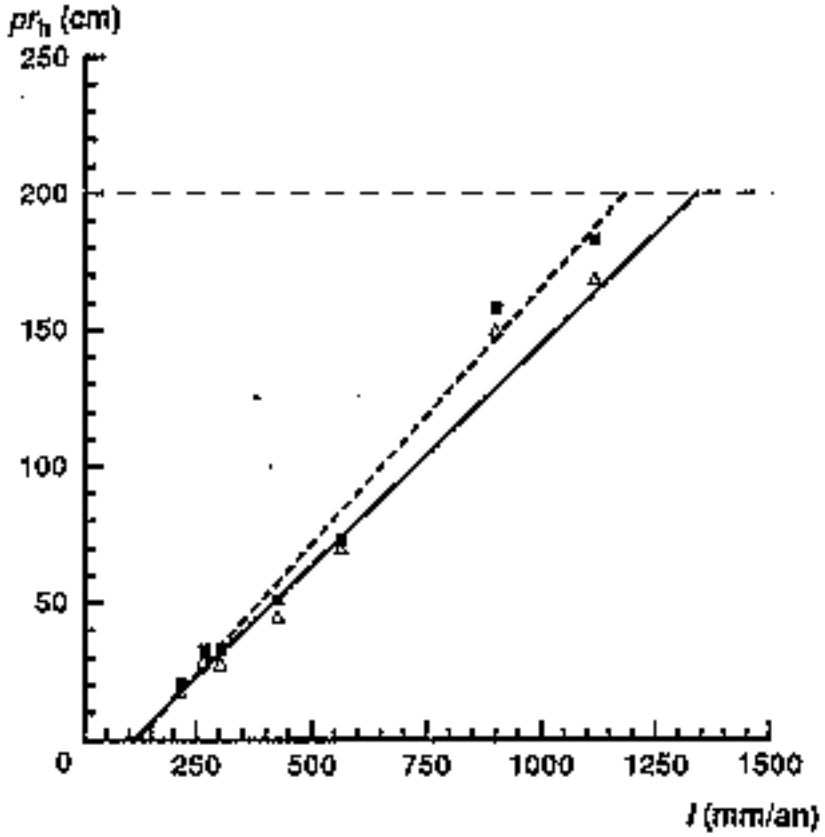


Figure III.11
Profondeur d'humidification du profil (pr_h) par rapport à la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour deux types de sol avec 0,15 (■---■) et 0,30 cm^3/cm^3 (Δ——Δ) de disponibilité en eau (taux d'humidité à pF2,5 moins le taux d'humidité à pF4,2), mais pour un taux d'humidité identique à la capacité au champ.

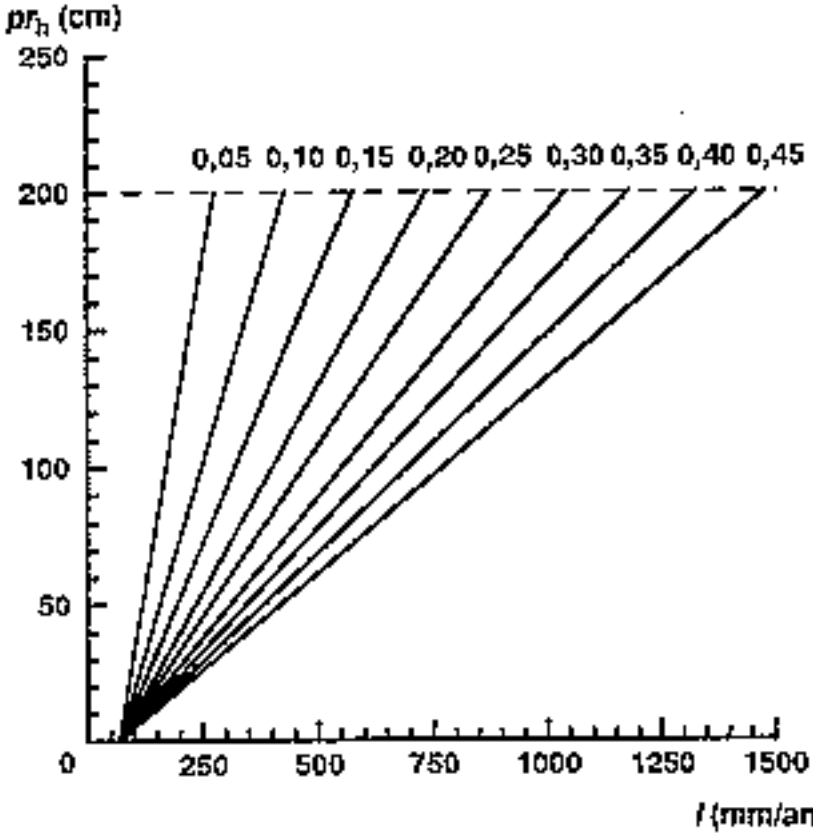


Figure III.12
Rapport entre la profondeur d'humidification du profil (pr_h) et la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour des types de sol avec différents taux d'humidité (cm^3/cm^3) à la capacité au champ.

Cf. équation II.6.

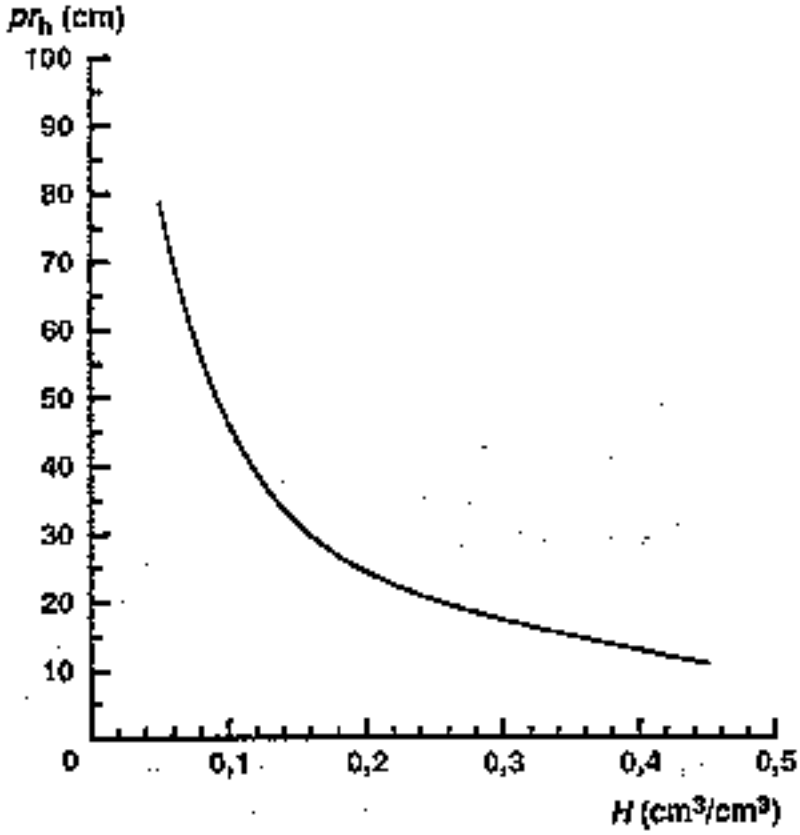


Figure III.14
Effet d'une différence de 70 mm d'eau infiltrée sur la profondeur d'humidification du profil (pr_h) en tant que fonction du taux d'humidité à la capacité au champ (pF 2,5 : H).

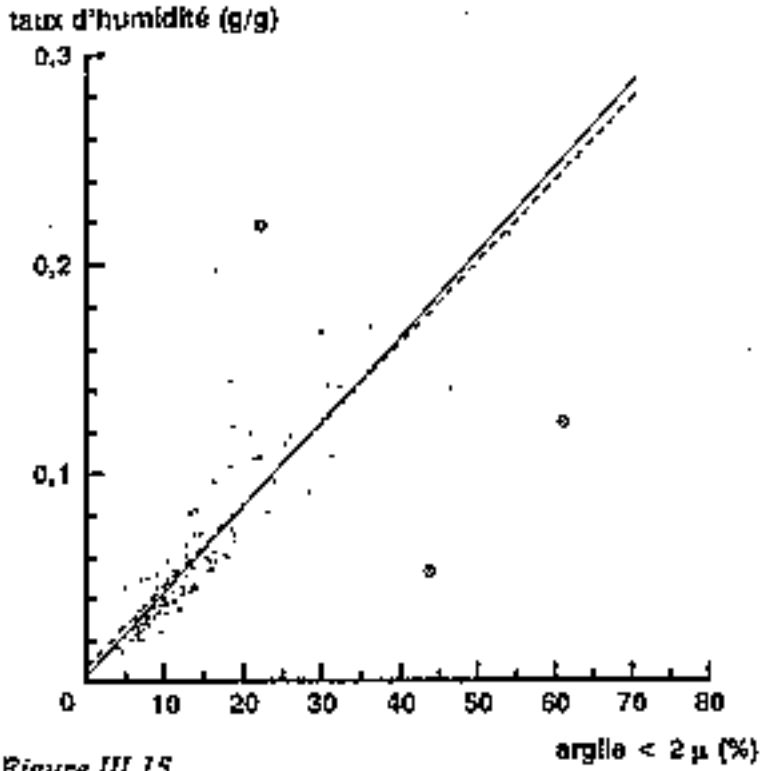


Figure III.15
Rapport entre le taux d'humidité du sol (fraction du poids) au point de flétrissement et le pourcentage d'argile pour des sols en Sierra Leone (-----), en comparaison avec ce rapport pour quelques sols au Mali (——').

Selon Dijkerman, 1975 et Brouwers & Keita, 1976 ; les observations encerclées n'ont pas été prises en considération lors de l'analyse de régression.

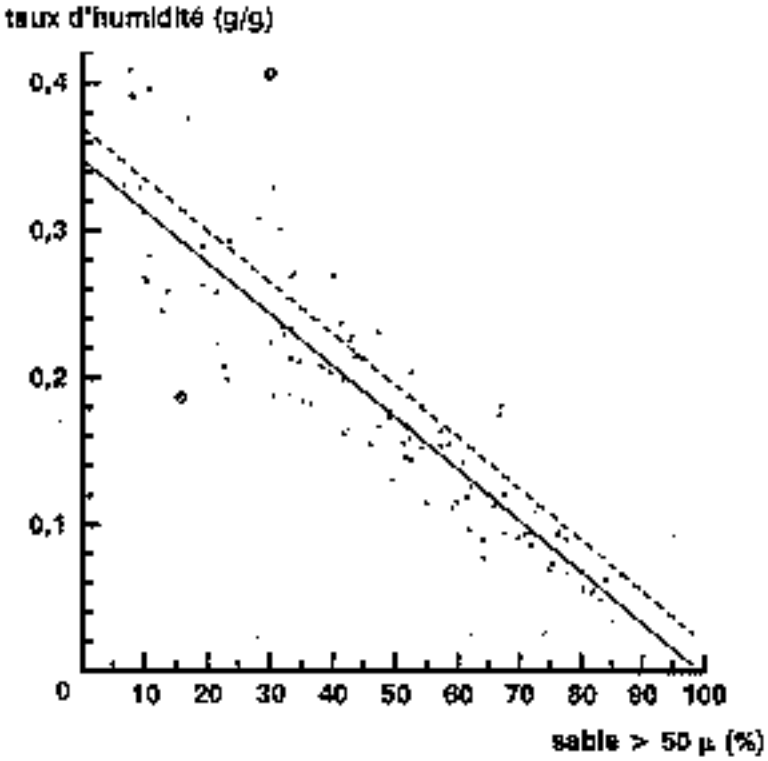


Figure III.16
Rapport entre le taux d'humidité du sol (fraction du poids) à la capacité au champ et le pourcentage de sable pour des sols en Sierra Leone (-----), en comparaison avec ce rapport pour quelques sols au Mali (——').

Selon Dijkerman, 1975 et Brouwers & Keita, 1976 ; les observations encerclées n'ont pas été prises en considération lors de l'analyse de régression.

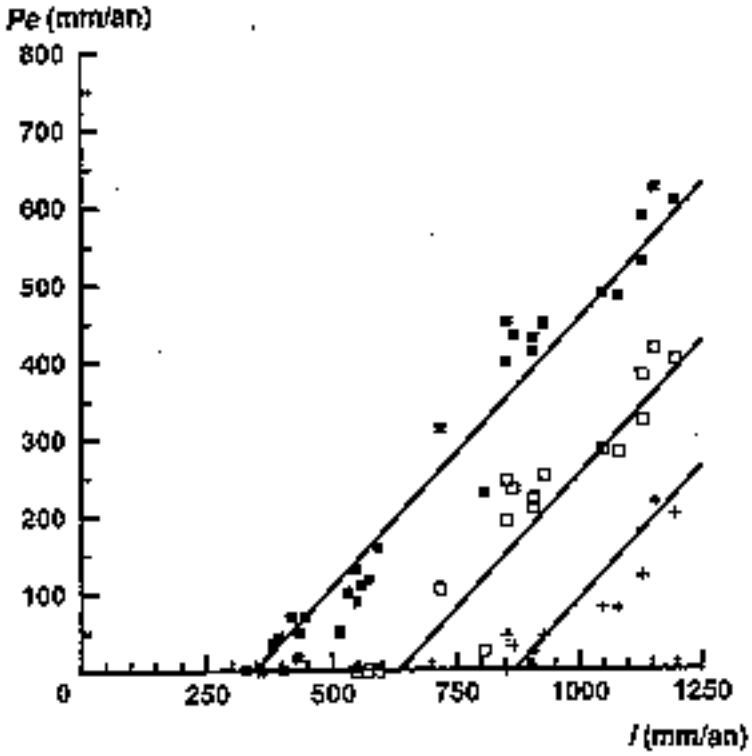


Figure III.17
Pertes d'eau simulées (Pe) hors d'un profil de 2 m de profondeur en tant que fonction de la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour 3 types de sol variant du point de vue du taux d'humidité à la capacité au champ et le point de flétrissement.

▪ θ à pF2,5 : 0,075 cm^3/cm^3, θ à pF4,2 : 0,025 cm^3/cm^3 ; ▫ θ à pF2,5 : 0,20 cm^3/cm^3, θ à pF4,2 : 0,10 cm^3/cm^3 ; + θ à pF2,5 : 0,30 cm^3/cm^3, θ à pF4,2 : 0,10 cm^3/cm^3.

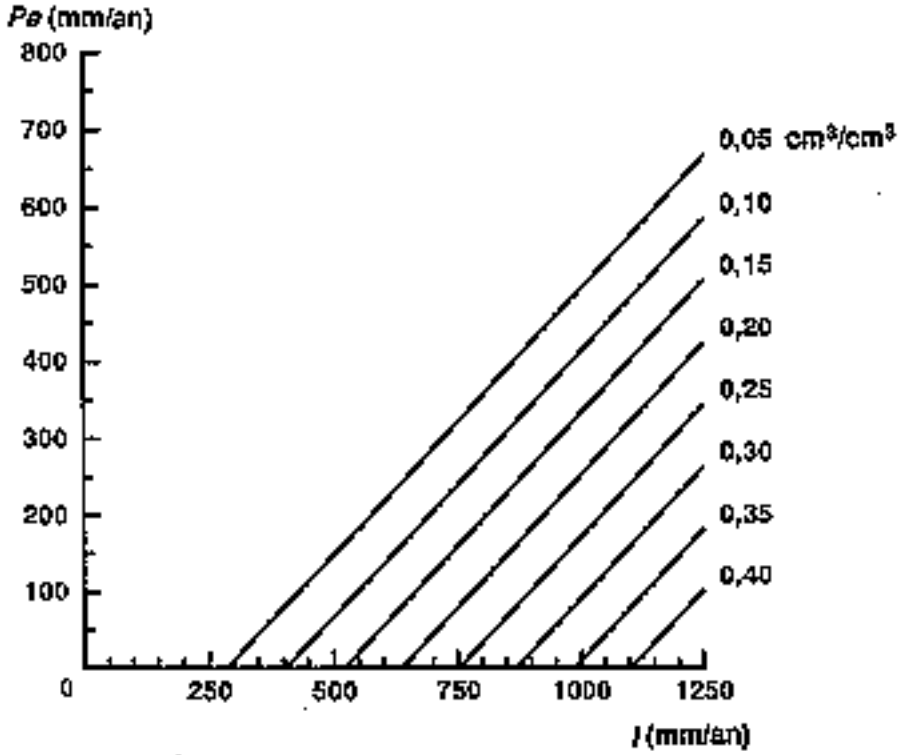


Figure III.18
Pertes d'eau simulées (Pe) hors d'un profil de 2 m de profondeur en tant que fonction de la quantité annuelle d'eau infiltrée (I) pour des types de sol variant du point de vue du taux d'humidité à la capacité au champ (cm^3/cm^3).

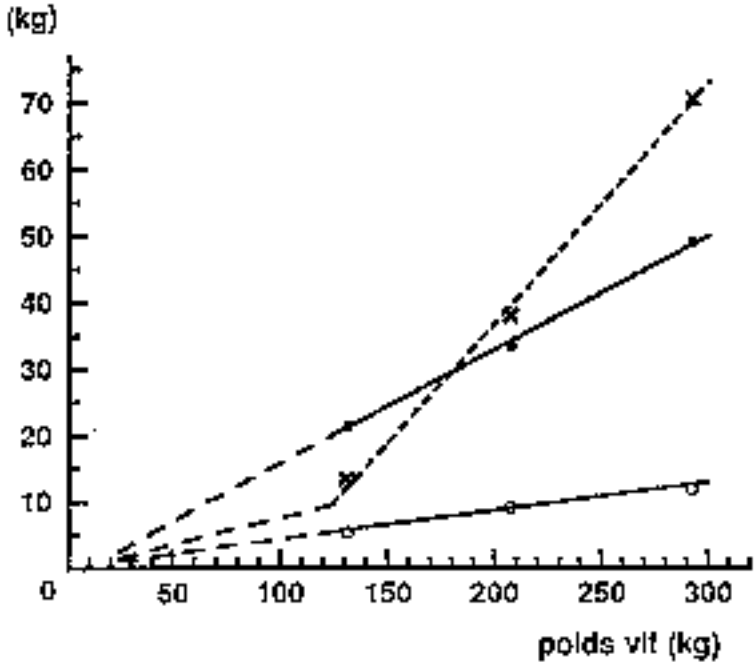


Figure III.27
Comparaison entre la quantité de protéines, de lipides et de minéraux corporels pour les génisses mashona en rapport avec leur poids vif.

• protéines, o minéraux et × lipides ; Chigaru & Holness, 1983 ; lignes pointillées représentent des estimations.

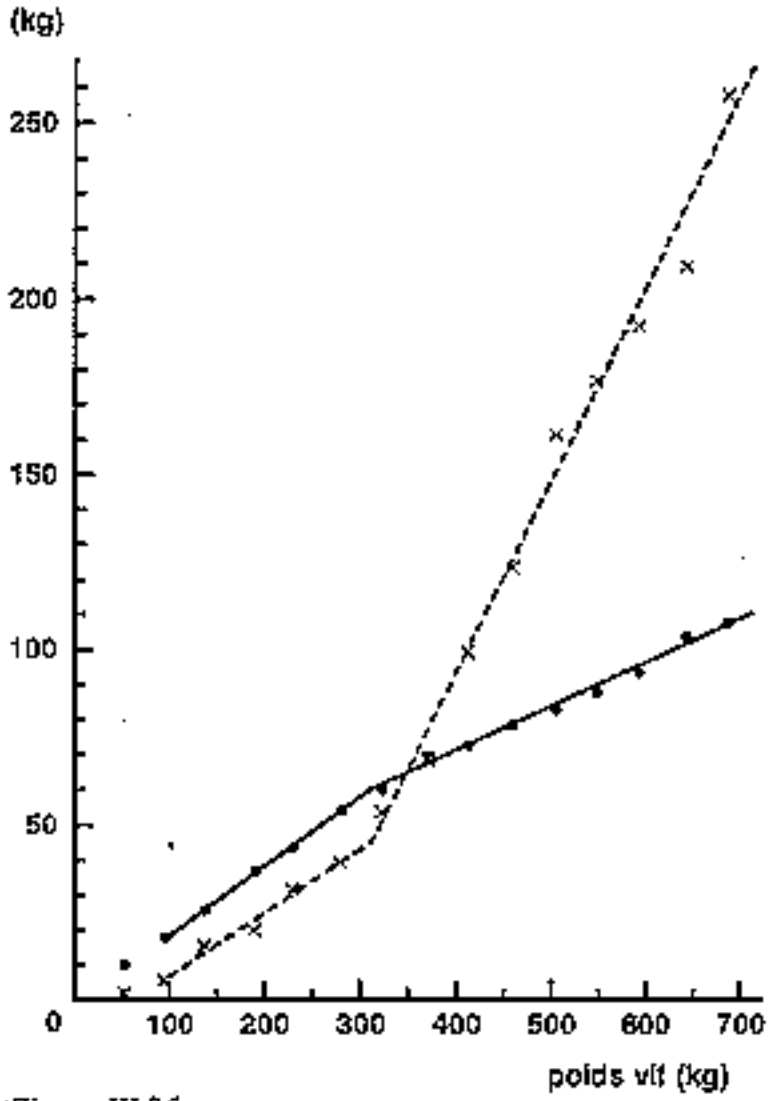


Figure III.26
Comparaison entre la quantité de protéines et de lipides corporels chez les boeufs « Shorthorn » en rapport avec leur poids vif.

• protéines, x lipides ; Haecker, 1920.

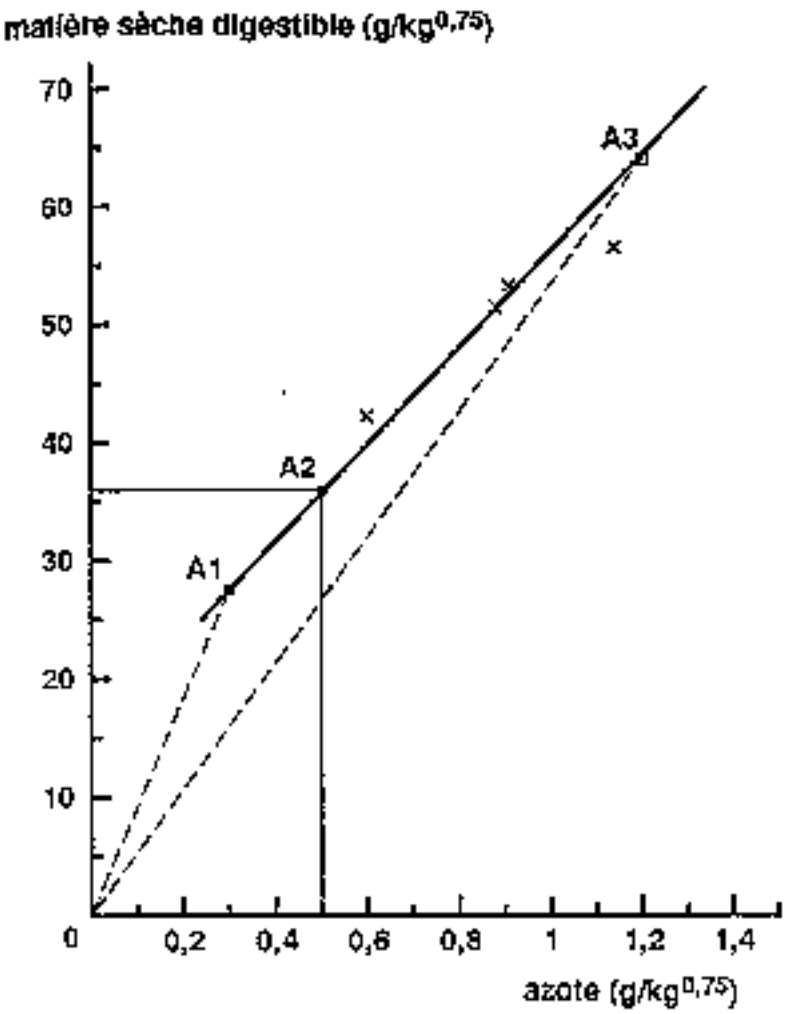


Figure III.2)
Représentation graphique pour les génisses mashona :
- *des besoins en énergie (ici ingestion de matière sèche digestible) et en protéines (ici ingestion d'azote) et*
- *de l'ingestion journalière de matière sèche digestible à partir de fourrages avec des rapports différents de digestibilité et de taux d'azote et une synthèse microbienne efficace des protéines (fourrages du groupe $PRO_{dé}$, voir texte).*

La droite A1-A2-A3 indique le besoin en énergie par rapport au besoin en protéines. A2 correspond au niveau d'entretien pour lequel l'ingestion de matière sèche digestible est de MD_{ing} = 36 g/kg^{0,75} par jour et l'ingestion d'azote de N_{ing} = 0,5 g/kg^{0,75} par jour. L'inclinaison de la droite est égale à 41 g de matière sèche par g d'azote et est obtenue par déduction à partir de la composition du gain de poids de génisses mashona. Il est supposé qu'au-delà et en-dessous du niveau d'entretien, les besoins en énergie et en protéines se comportent de manière analogue.
A1 et A3 représentent les ingestions de matière sèche digestible de fourrages ayant respectivement un rapport faible et élevé de protéines/énergie, ce qui ressort d'ailleurs de l'inclinaison des droites en pointillés. Les croix concernent les résultats d'essais alimentaires avec des génisses mashona (Elliott, 1967). Les fourrages étaient des mélanges de *Chloris gayana* et de fourrages concentrés. La droite de l'ingestion maximale de matière sèche digestible pour une ingestion d'azote donnée est représentée.

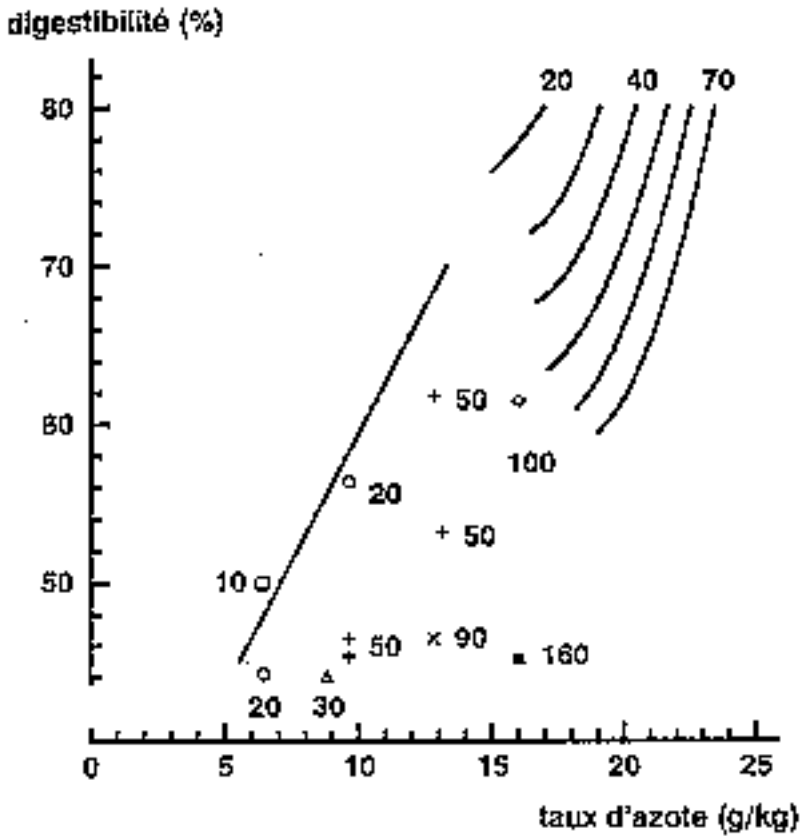


Figure III.22
Rapport entre la concentration d'ammoniaque mesurée dans la panse (mg NH_3-N par litre), le taux d'azote et la digestibilité de la matière sèche du fourrage.

Les courbes proviennent de Satter & Roffler (1981), d'observations individuelles d'Elliott & Topps (1964) : à gauche de la droite se situent les fourrages appartenant au groupe $PRO_{dé}$, à droite les fourrages du groupe PRO_{su} (voir texte).

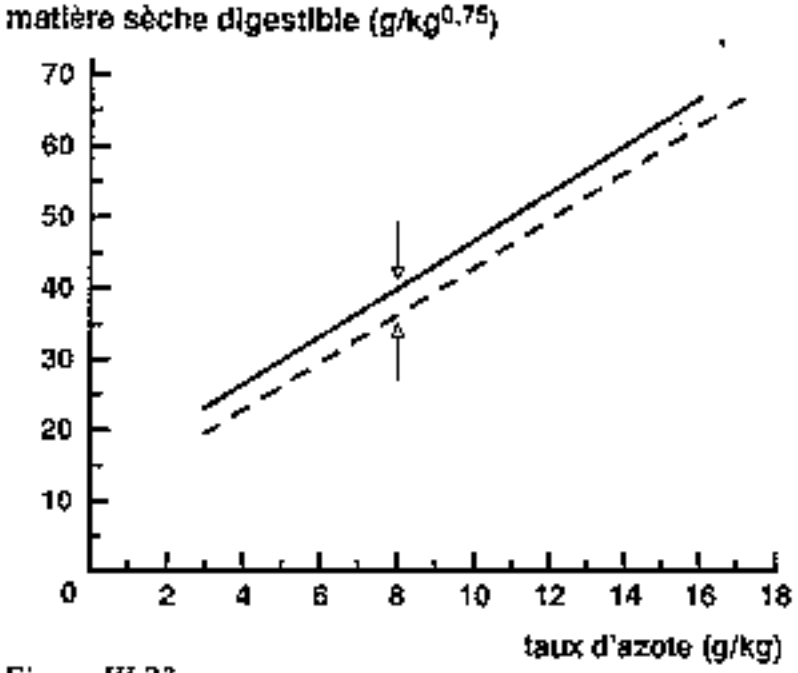


Figure III.23
Rapport mesuré (——) entre l'ingestion journalière de matière sèche digestible (MD_{ing}) et le taux d'azote du fourrage [N] pour des bovins sur des pâturages naturels en Australie, comparé au rapport obtenu par déduction (– – –) pour les bovins sur le pâturage naturel moyen (tableau III.13) dans les pays sahéliens.

Rapport mesuré suivant Hendricksen *et al.*, 1982 ; rapport déduit : $MD_{ing} = 3{,}33\ [N] + 9{,}4$.
Les flèches indiquent le niveau de maintien.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN3_25.GIF

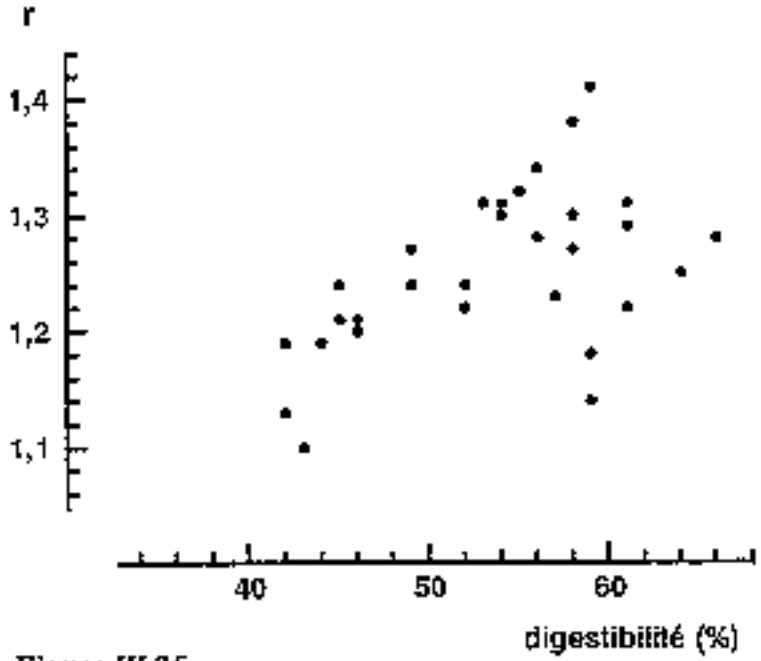


Figure III.25
Relation entre l'ingestion de fourrages de vaches produisant du lait et de vaches n'en produisant pas (r) en rapport avec la digestibilité de la matière organique du fourrage.

Elliott & Fokkema, 1961 ; Elliott *et al.*, 1961.

http://library.wur.nl/way/catalogue/documents/Sahel/MANUAL/MAN3_25.GIF26-4-2010 11:23:43

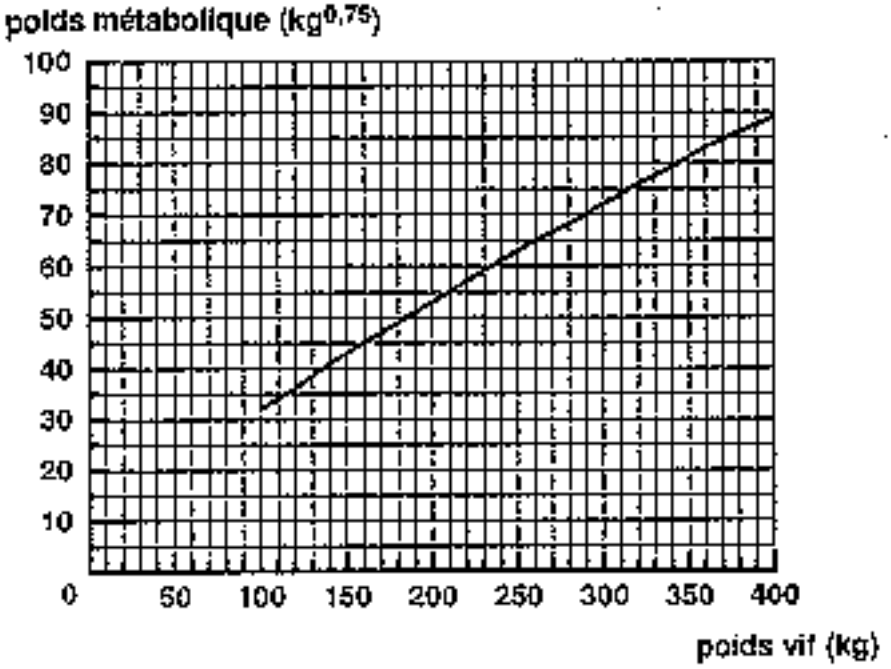


Figure III.28
Rapport entre le poids métabolique des bovins et le poids vif.

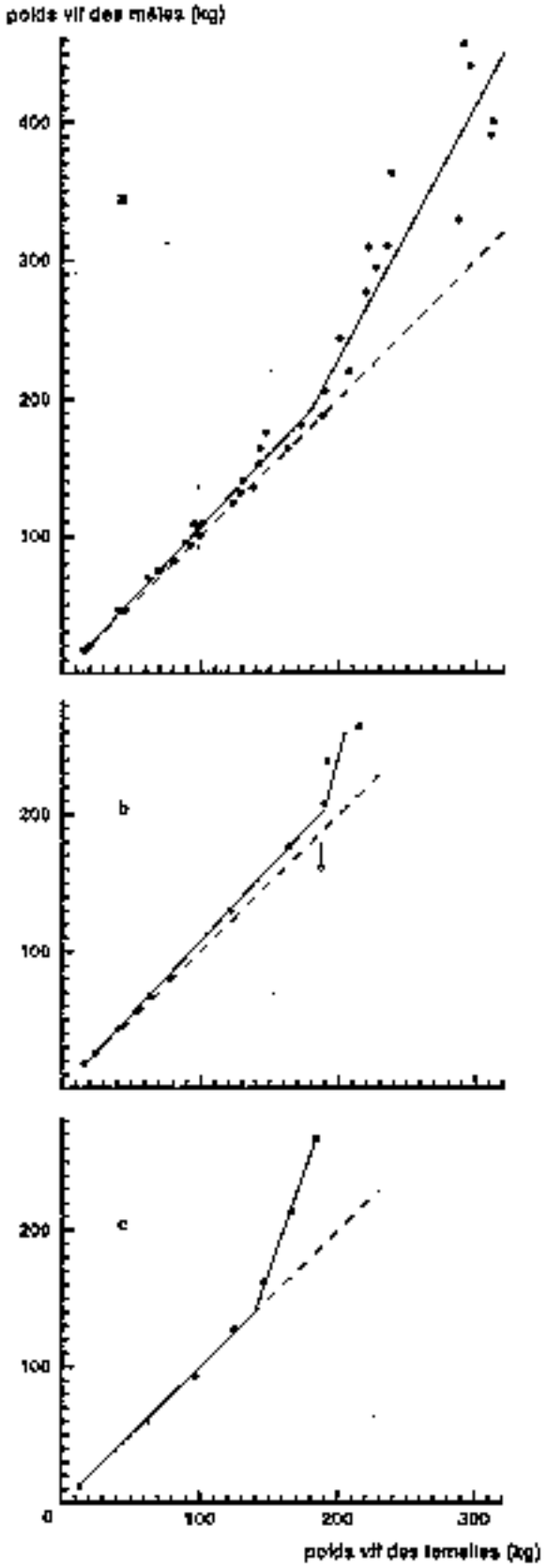


Figure III.29
Rapport entre les poids des mâles et femelles n'dama (a), zébu-peul (b) et baoulé (c) à un âge identique et dans des conditions analogues d'alimentation (——), comparé à la situation théorique sans différences de poids entre les sexes (----).

a : jusqu'à un poids de la femelle de 170 kg : PV ♂= 1,07 PV ♀ (ILCA, 1979)
b : jusqu'à un poids de 185 kg de l'animal femelle : PV ♂= 1,08 PV ♀ (Wagenaar *et al.*, 1986)
c : jusqu'à un poids de 140 kg de l'animal femelle il n'y a pas de nette différence de poids entre les

b : jusqu'à un poids de 185 kg de l'animal femelle : PV ♂= 1,08 PV ♀ (Wagenaar *et al.*, 1986)

c : jusqu'à un poids de 140 kg de l'animal femelle il n'y a pas de nette différence de poids entre les animaux mâles et femelles (ILCA, 1979).

La flèche indique le poids moyen du début de la première gestation des génisses zébu-peul.

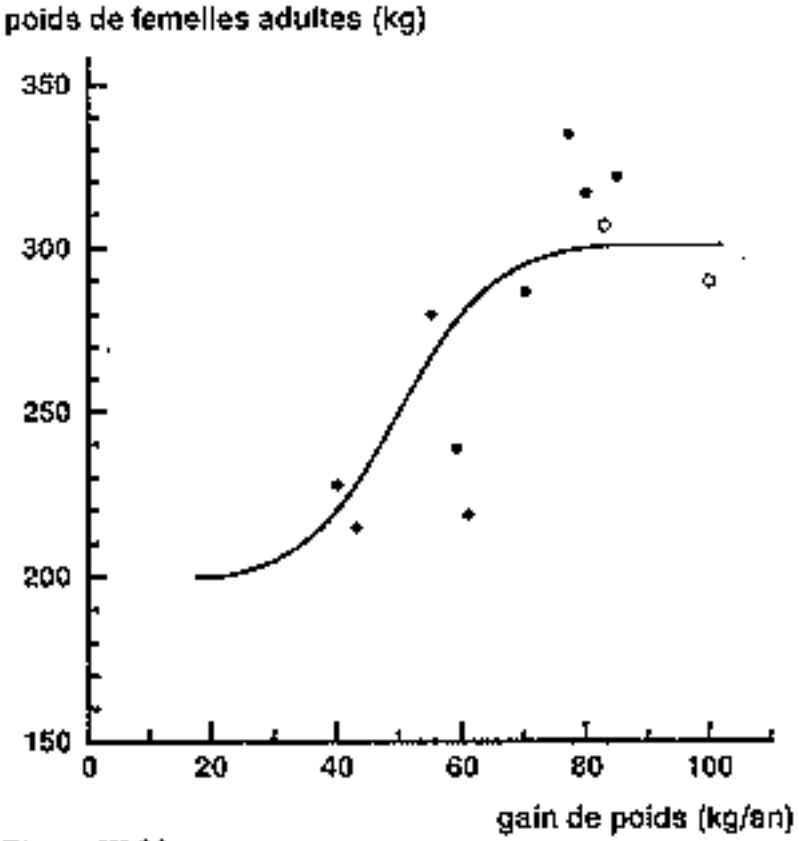


Figure III.30
Rapport entre le poids adulte des bovins femelles et l'accroissement du poids des génisses de la même population pendant la seconde année de vie.

Données relatives aux races n'dama, zébu-peul, zébu-azawak, « Shorthorn » de l'Afrique de l'Ouest × azawak × n'dama, et bunaji ; Bartha, 1971 ; CIPEA, 1978 ; Fall *et al.*, 1982 ; ILCA, 1979 ; Wagenaar *et al.*, 1986 ; Wheat *et al.*, 1972 ; Wheat & Broadhurst, 1968 et Wilson, 1983 ; vaches adultes de 3 ans ○, de ≥ 4 ans ●.

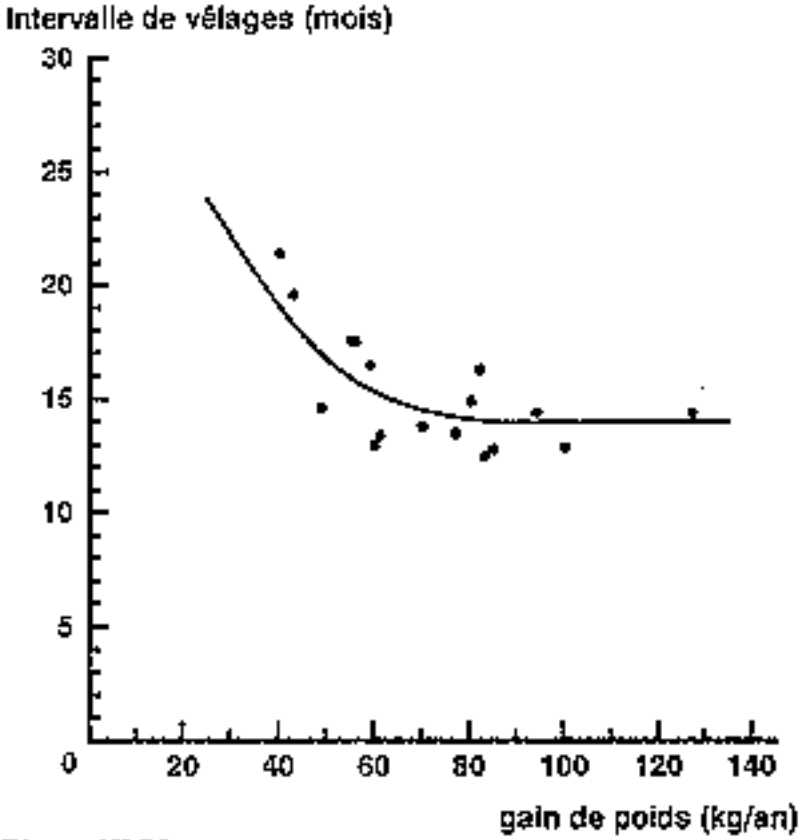


Figure III.33
Rapport entre l'intervalle de vêlage de vaches et le gain de poids des génisses, de la même population, pendant leur seconde année.

Races de bovins : n'dama, zébu-peul, zébu-azawak, West-African "Shorthorn" × azawak × n'dama, bunaji, sokoto gudali et wadara ; Bartha, 1971 ; CIPEA, 1978 ; Fall *et al.*, 1982 ; ILCA, 1979 ; Otchere, 1984, Wagenaar *et al.*, 1986 ; Wheat *et al.*, 1972 ; Wheat & Broadhurst, 1968 et Wilson, 1983.

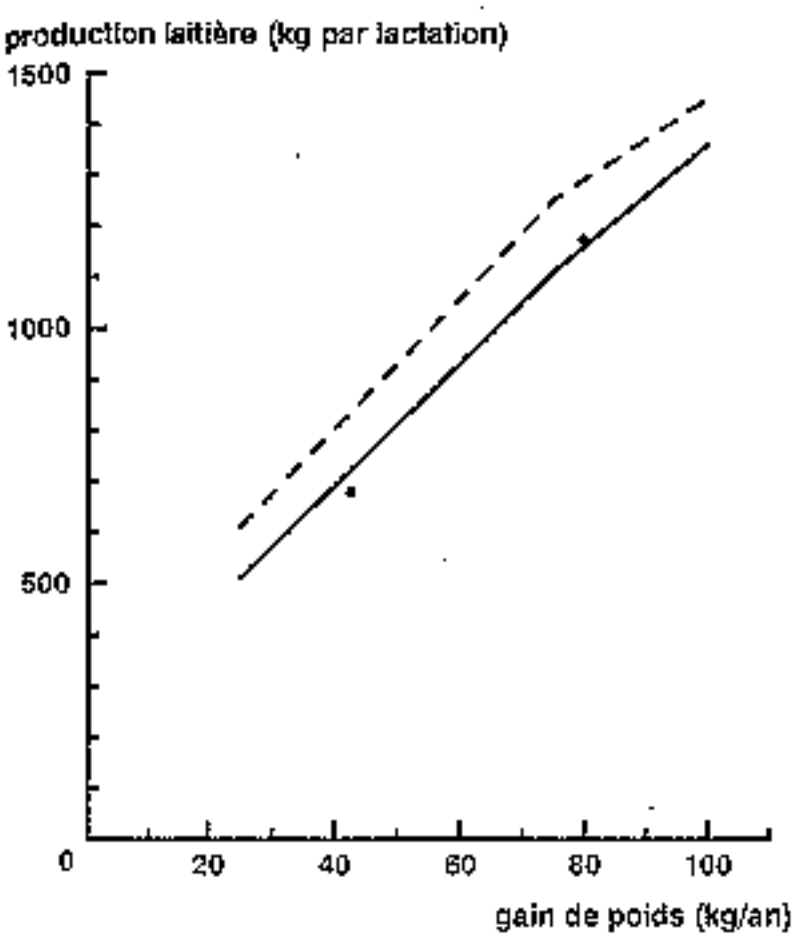


Figure III.31
Rapport entre la production laitière de vaches et le gain de poids de génisses, de la même population, pendant leur seconde année (comme mesure de la qualité des fourrages).

Rapport pour une ingestion de fourrage de 20 % supérieure pendant la période de lactation, avec deux valeurs mesurées au Mali (——) ; rapport dans l'hypothèse où l'ingestion serait plus élevée de 25 % (----).

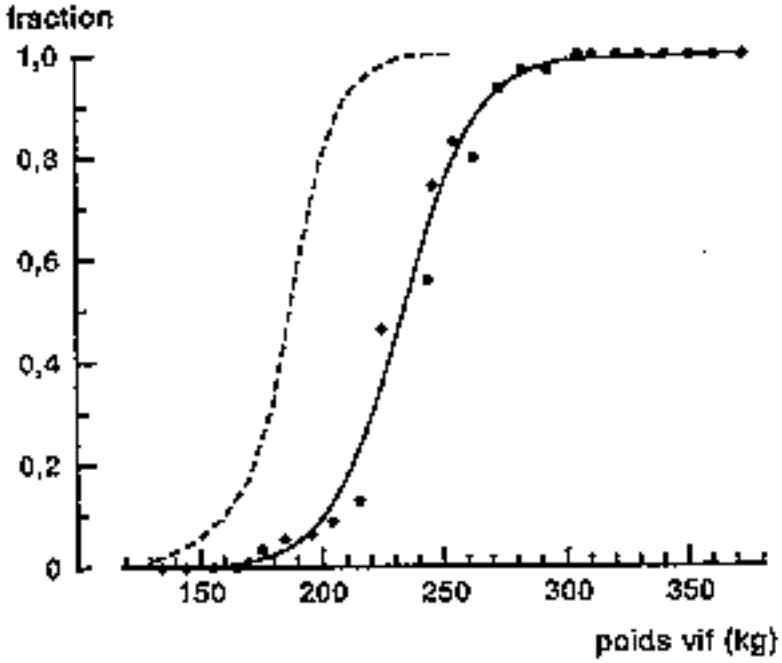


Figure III.32
Rapport entre la fraction de vaches zébu-peul en gestation (----), ou fraction de vaches hereford en chaleur (•——•), et leur poids vif.

Zébu-peul. Wagenaar *et al.*, 1986 ; hereford, Cohen *et al.*, 1980.

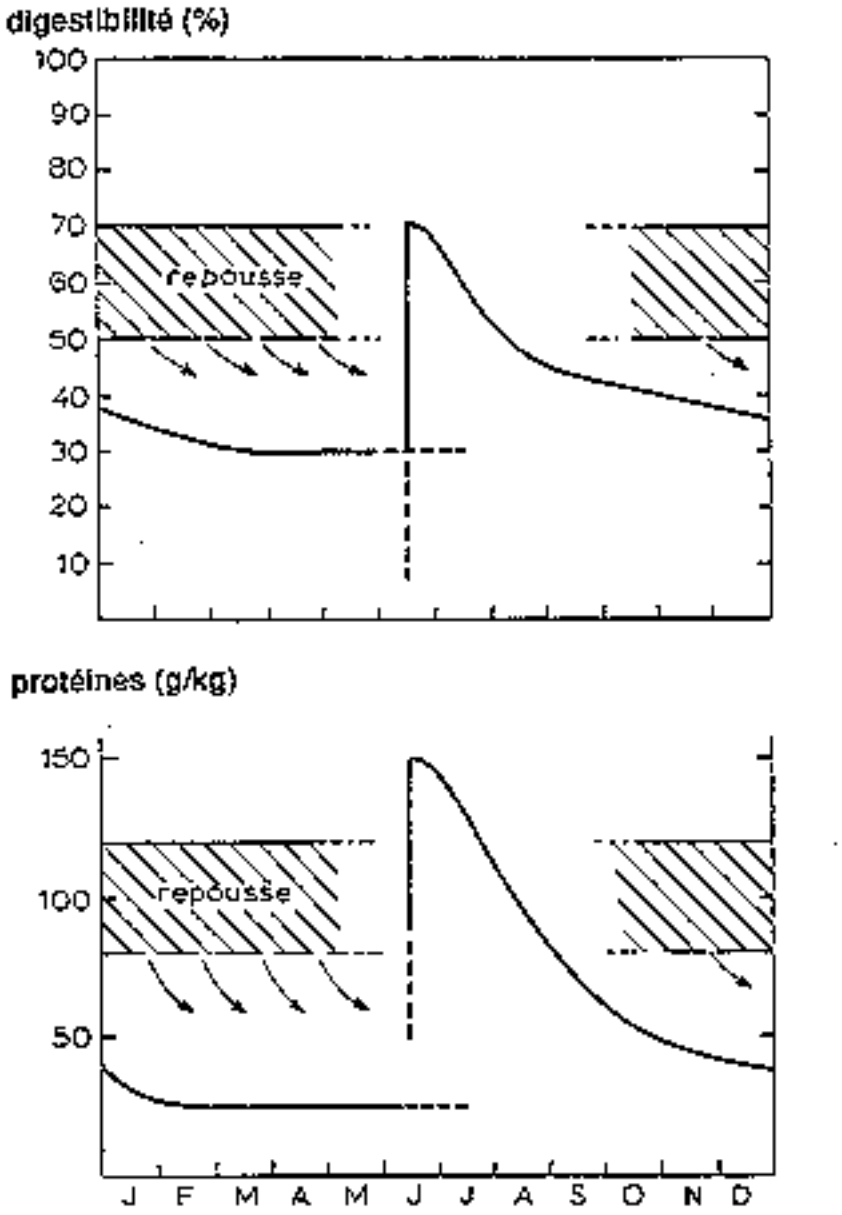


Figure III.34
Evolution de la digestibilité de la matière organique et du taux de protéines des graminées pérennes au cours de l'année.

La courbe (——) présente dans les deux cas l'évolution de la biomasse principale, celle de l'hivernage. Les valeurs pour des jeunes repousses sont indiquées par des bandes hachurées. La diminution des ces valeurs, dès que les repousses vieillissent, est représentée par des flèches, suivant le cours de la courbe principale. Penning de Vries & Djitèye, 1982 : p. 287.

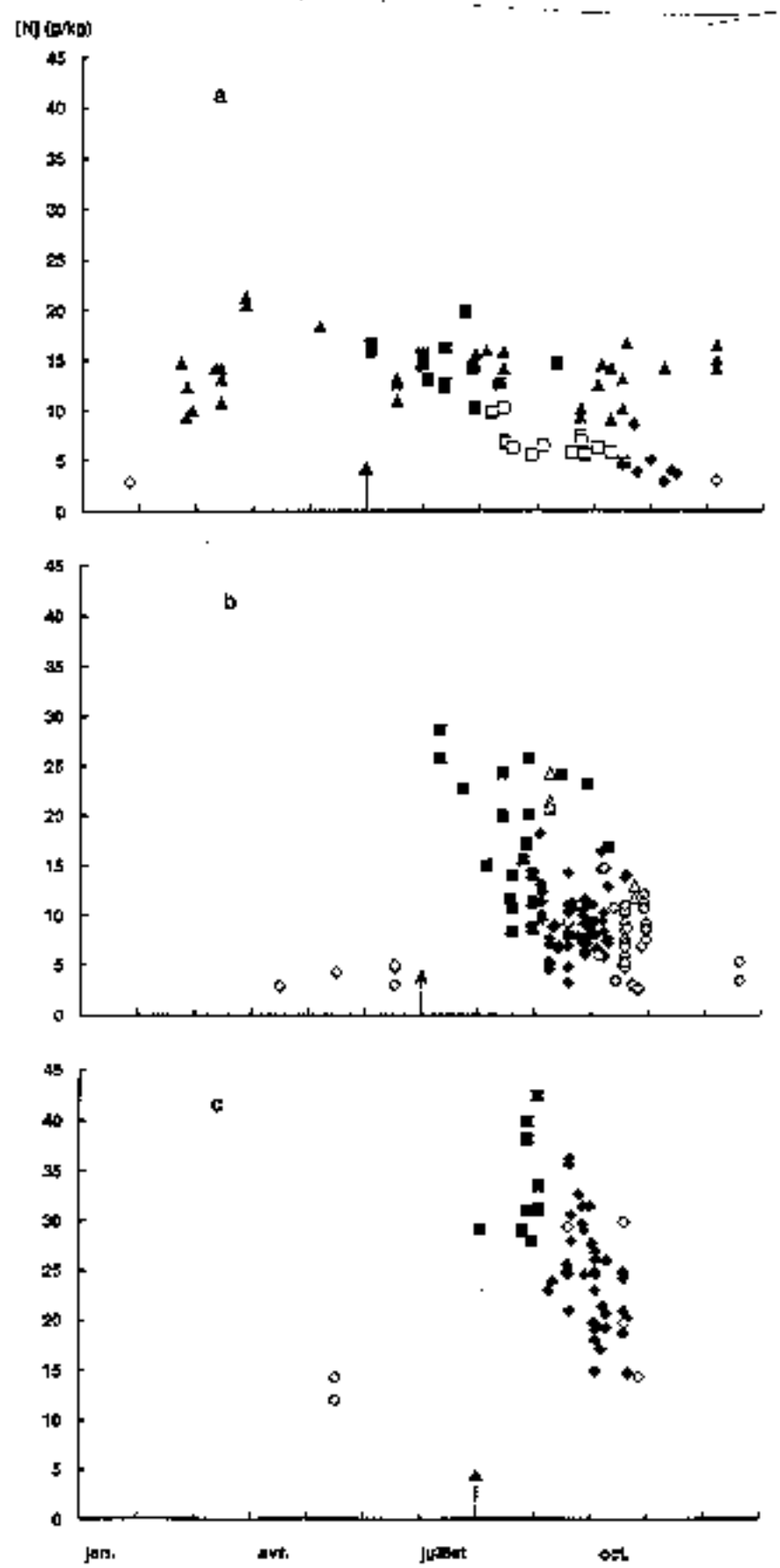
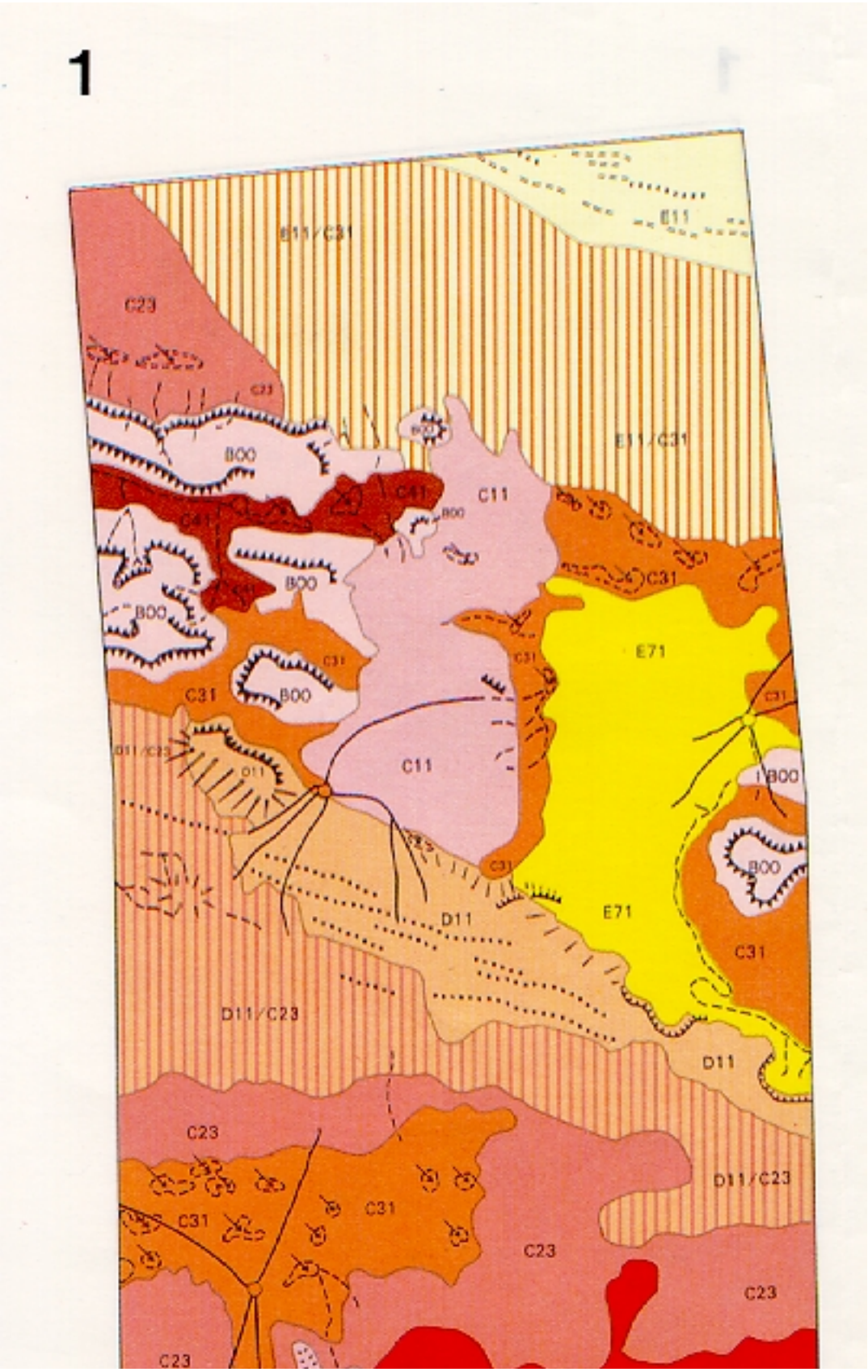


Figure IV.1
Evolution du taux d'azote de la biomasse aérienne d'Andropogon Gayanus (a), Schoenefeldia gracilis (b) et Zornia glochidiata (c) au cours des saisons.

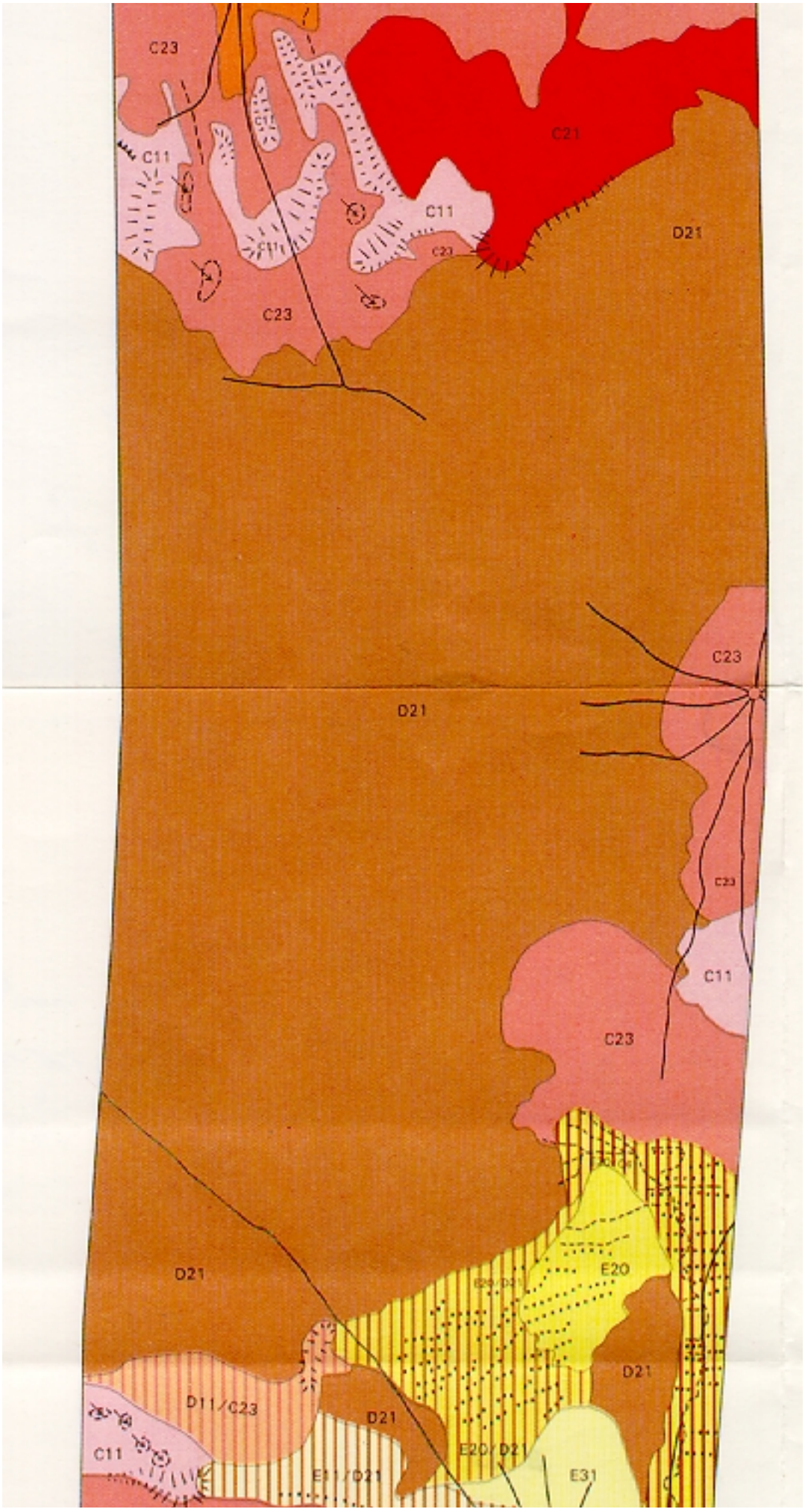
La flèche indique le démarrage le plus tôt de la saison de croissance pour laquelle des échantillons

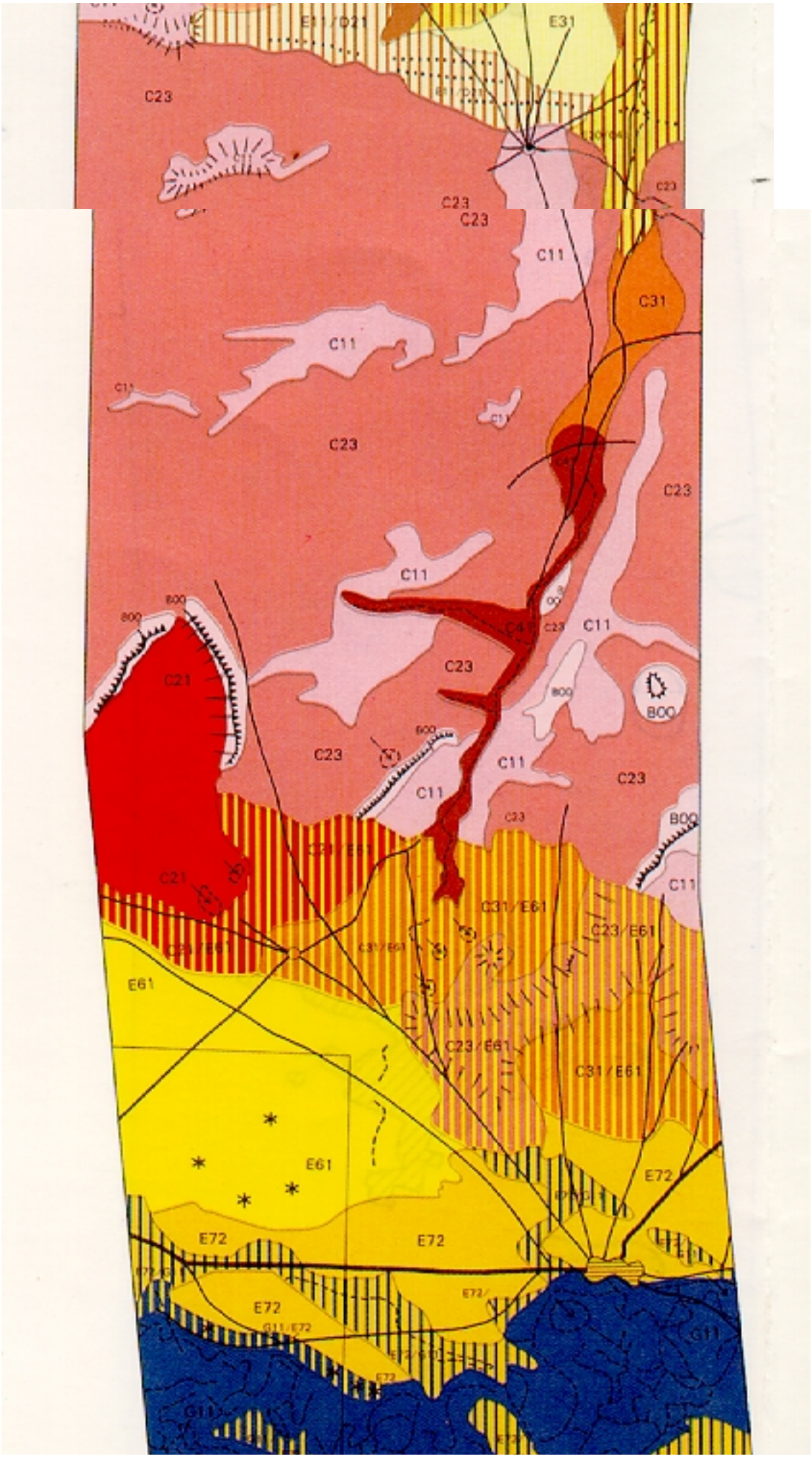
La flèche indique le démarrage le plus tôt de la saison de croissance pour laquelle des échantillons ont été recueillis. Les phases de développement distinguées concernent: ■ végétatif; □ formation de tiges; ◆ génératif; ◊ foin sur pied; ▲ repousse. Δ : échantillons de *Schoenefeldia gracilis* recueillis dans la phase générative sur un terrain près d'un point d'abreuvement, dominé par *Zornia glochidiata*.

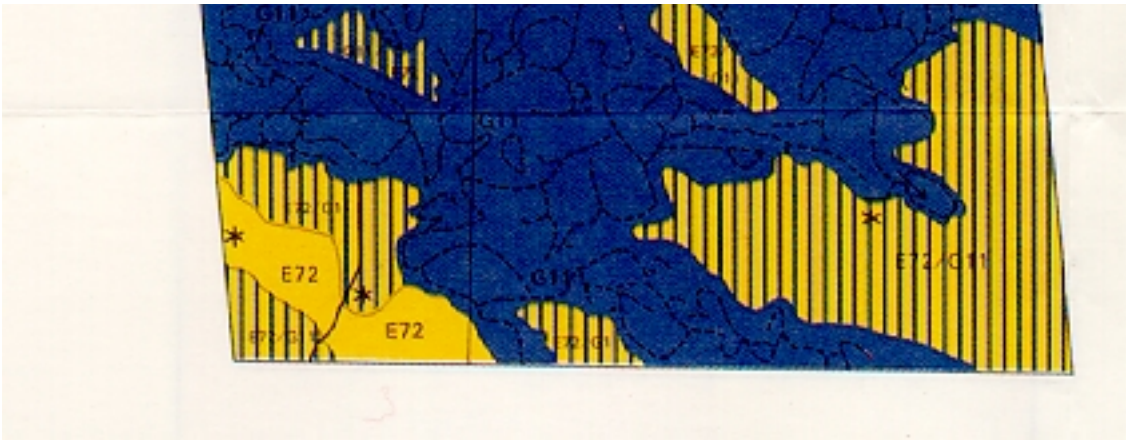
Carte de paysages semi-detaillee (Mali)
Transect 1



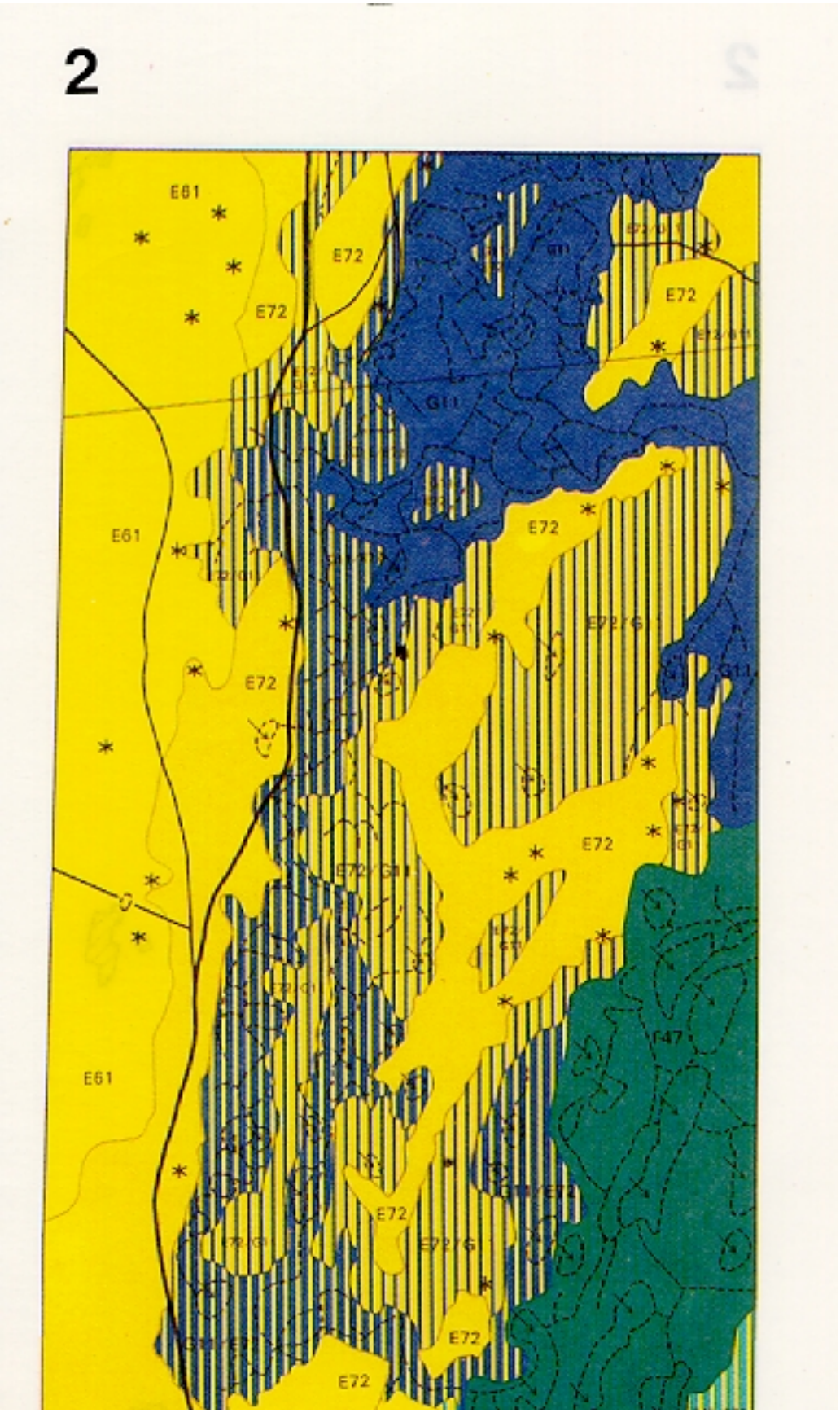
[Légende]


C23
C21
C11
C11
C11
C23
C23
D21
C23
D21
C23
C11
C23
D21
E20
D21
D11/C23
D21
C11
E20/D21
E31/D21
E31


E11/D21
E31
C23
C23
C23
C11
C31
C11
C23
C23
C11
C11
C23
C21
C23
C11
C23
C11
C23
C11
C31/E61
C23/E61
E61
C23/E61
C31/E61
E61
E72
E72
E72
E72
G11/E72
G11
G11

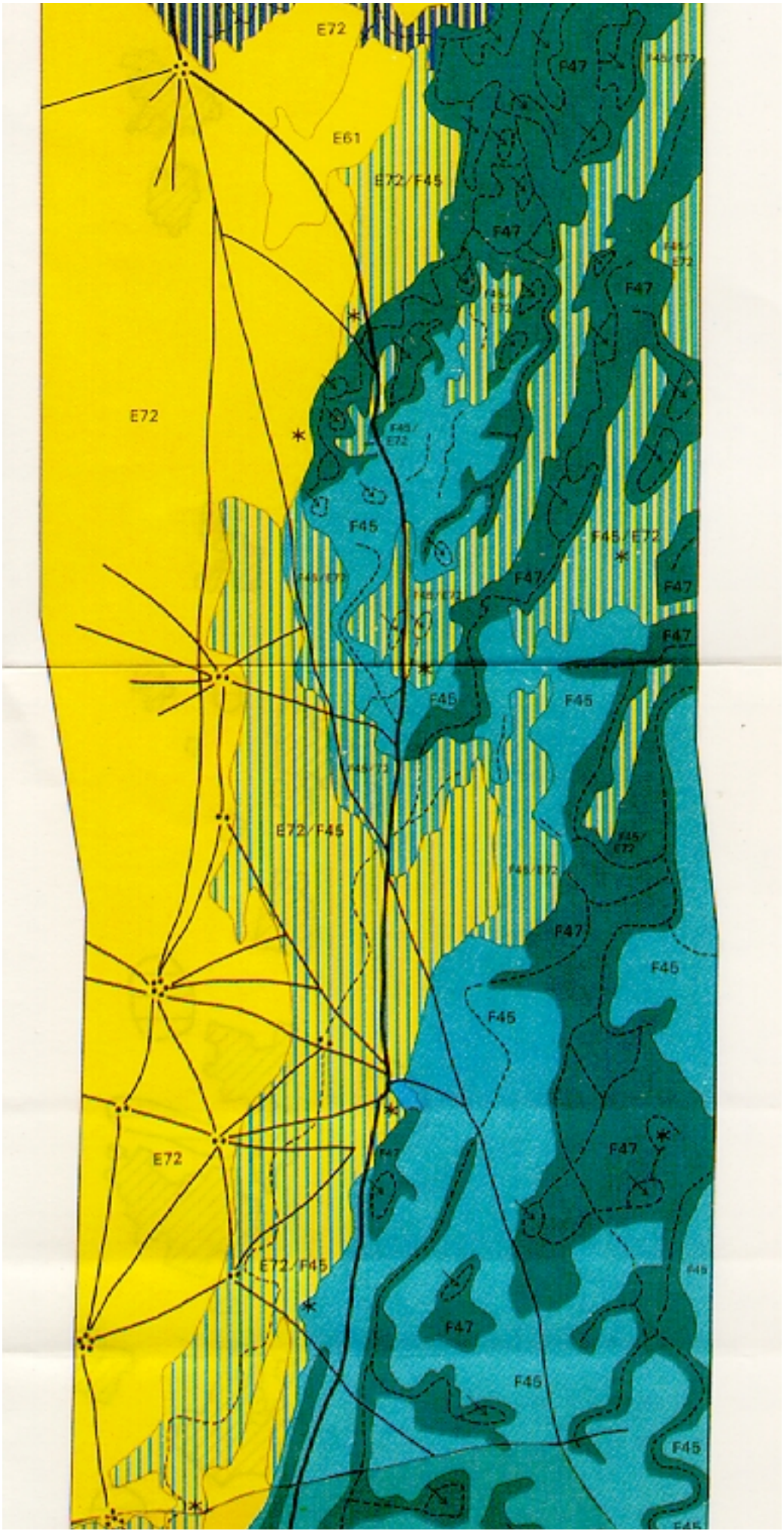

E72
E72
E72/G11

Carte de paysages semi-detaillee (Mali)
Transect 2

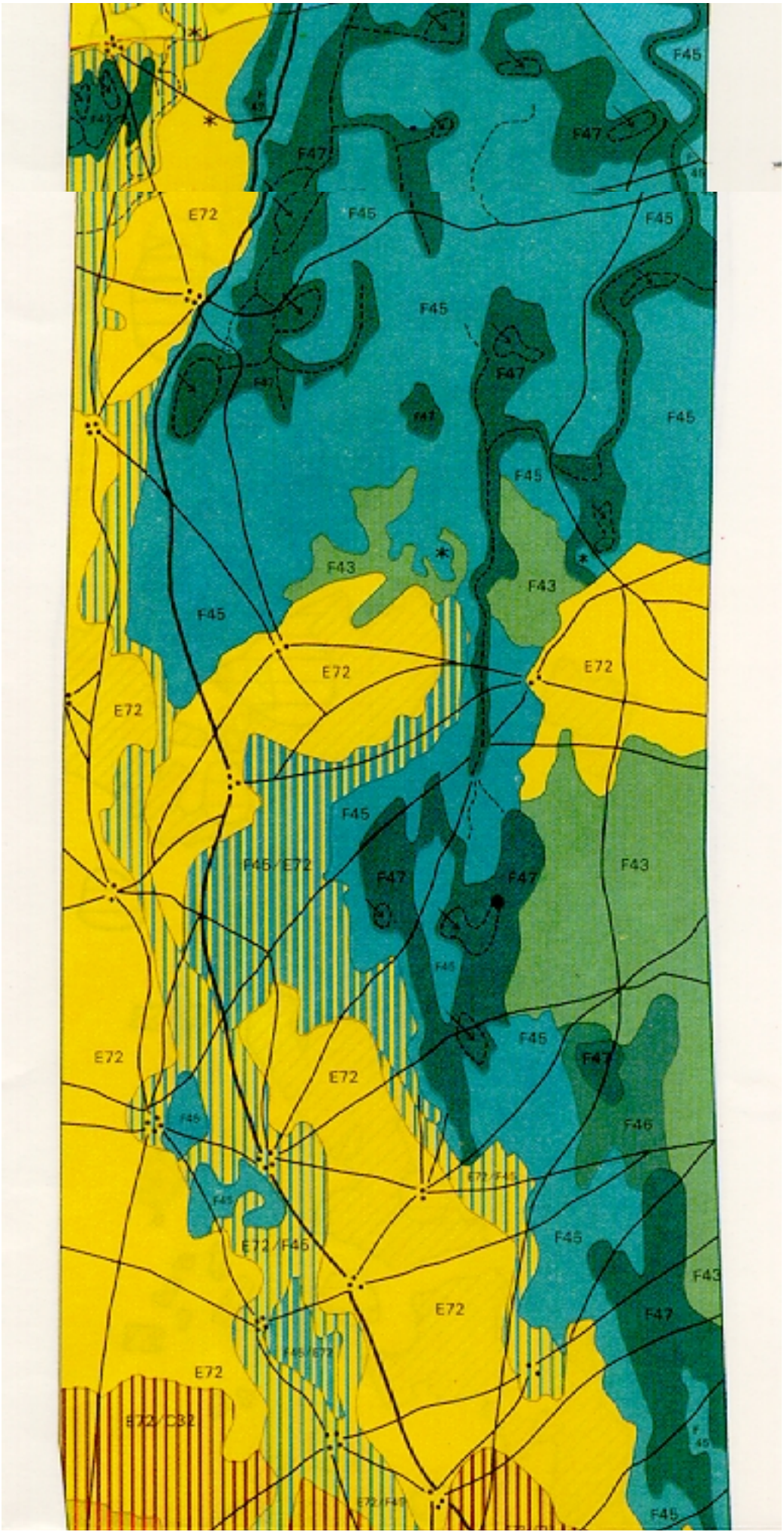


[Légende]

transect 2

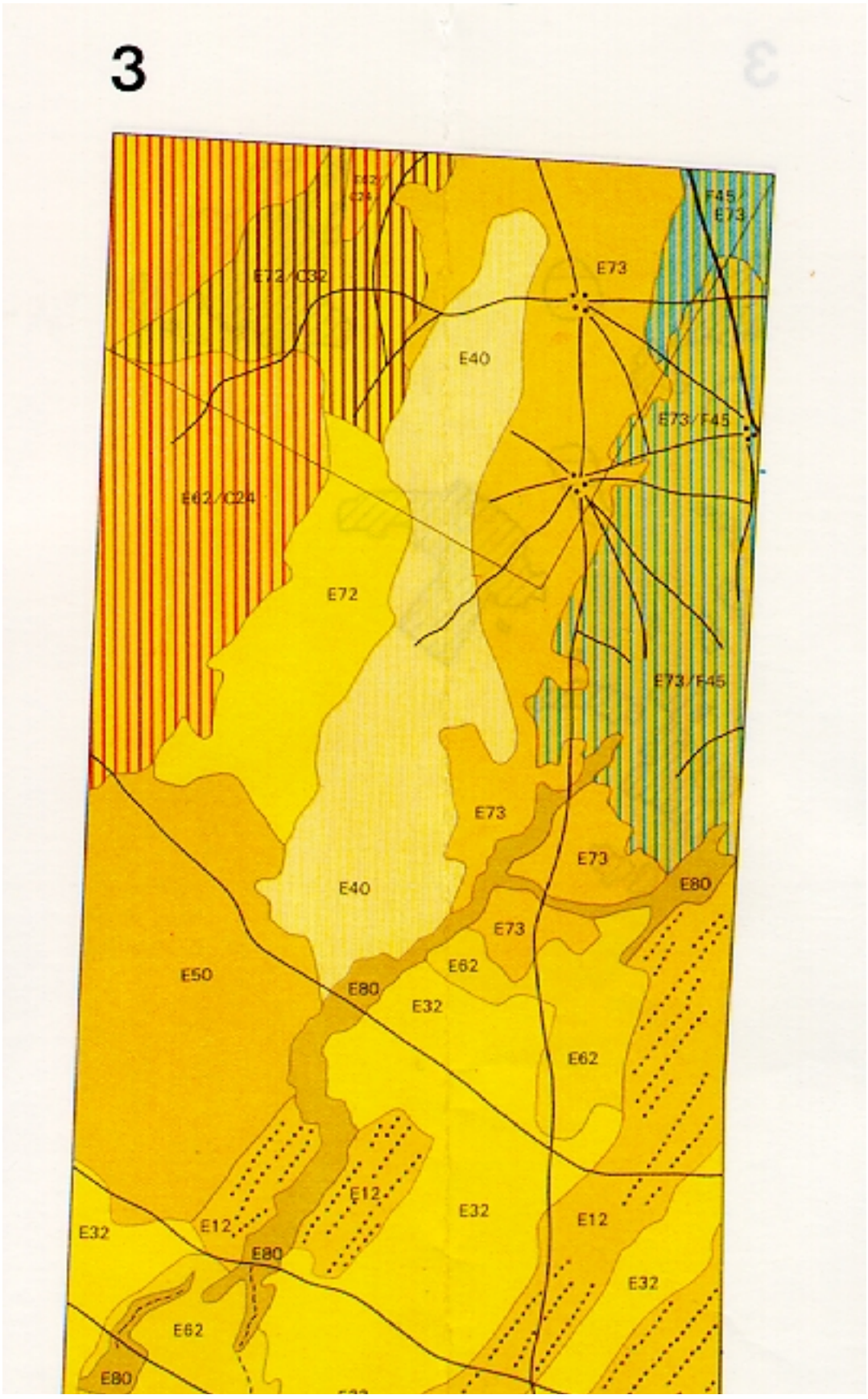

E72
F47
E61
E72/F45
F47
F47
E72
F45
F45/E72
F47
F47
F47
F45
F45
E72/F45
F47
F45
F45
E72
F47
E72/F45
F47
F45
F45

transect 2



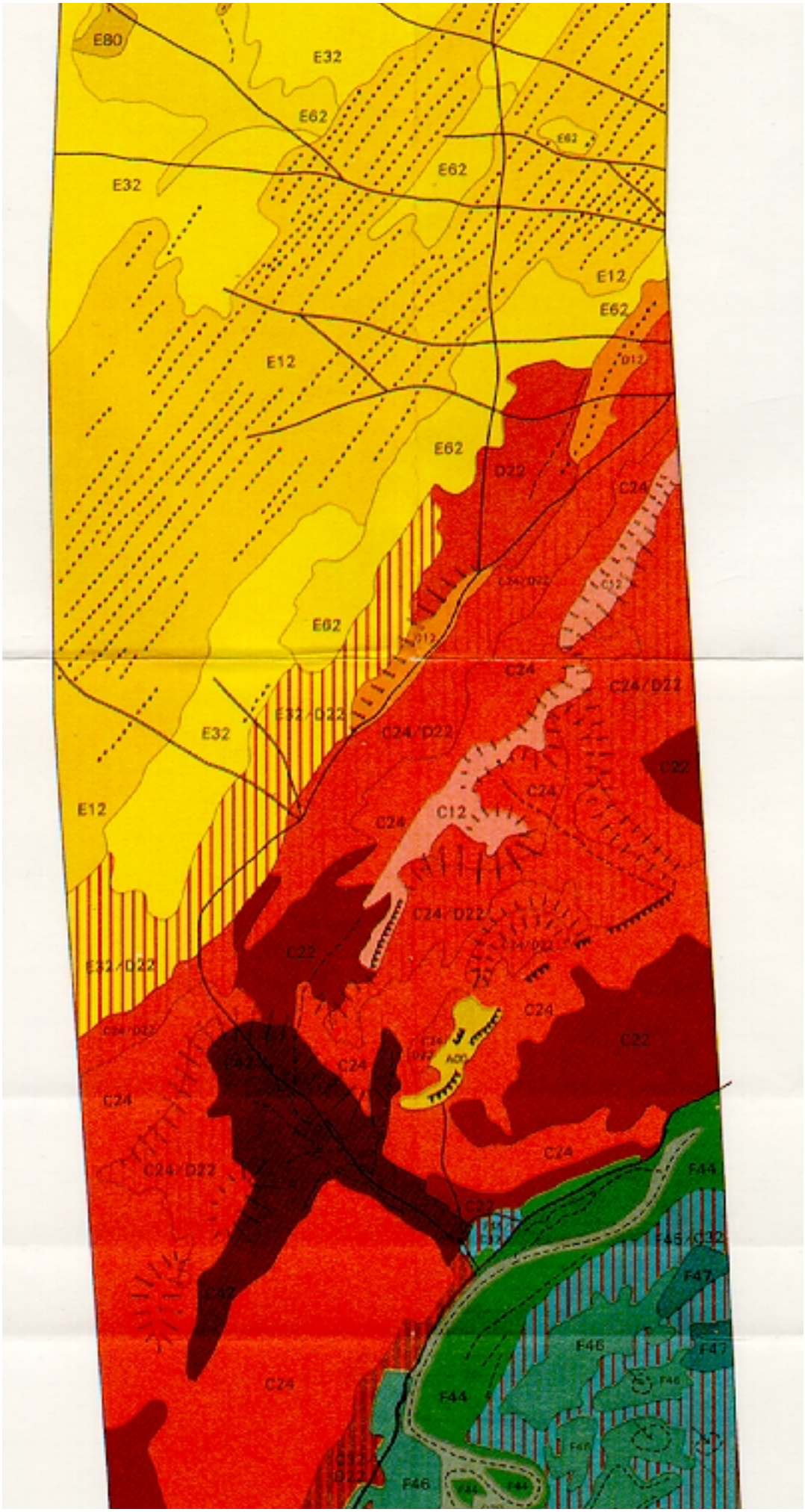
E62/C24
F45
E72
F45/E72
E73
F45
E72/C32
E62/C24
F45/E73
E73
E72/C32
E40
E62/C24
E62/C24
E72
E73

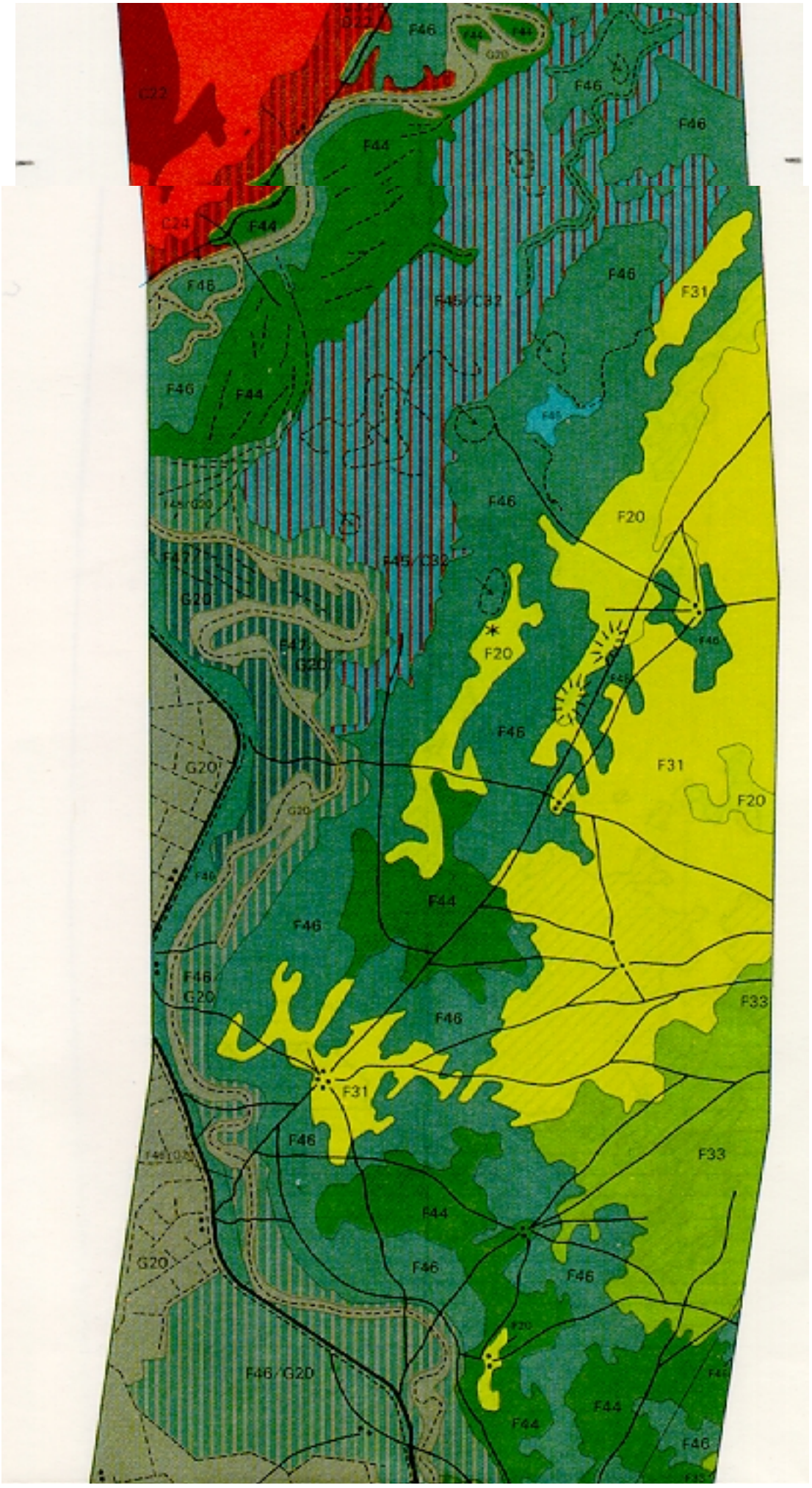
Carte de paysages semi-detaillee (Mali)
Transect 3



[Légende]

transect 3

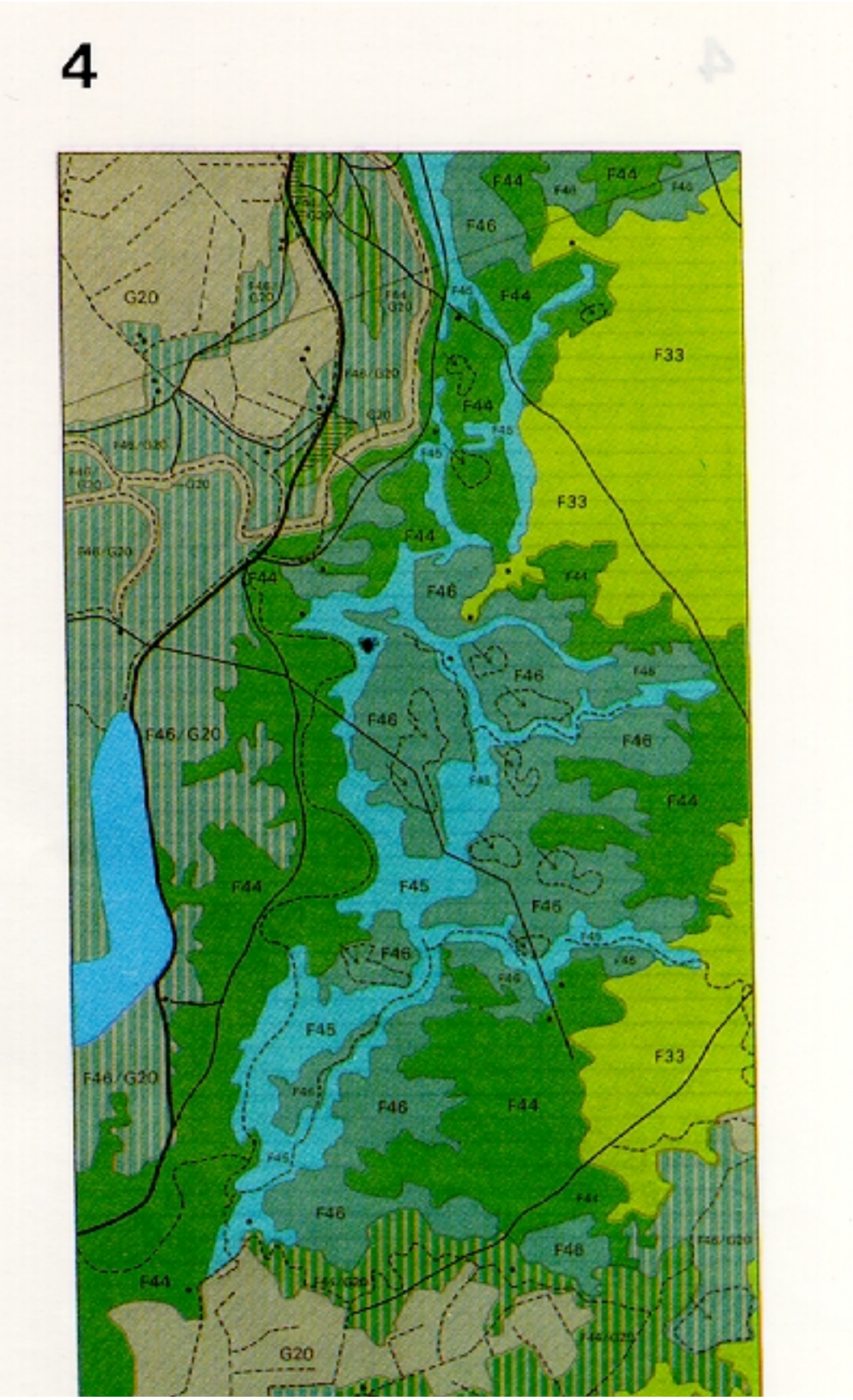

E80
E32
E62
E62
E32
E12
E62
E12
E62
D22
C24
E62
C24
C24/D22
E32/D22
E32
C24/D22
C22
E12
C24
C12
C24
C24/D22
C22
E32/D22
C24
C22
C24
C24
C24
C24/D22
F44
F47
F46
F47
C24
F44
F46


G22
F46
F44
G20
F46
F46
F44
C24
F44
F46
F46/C32
F31
F46
F44
F46
F20
F45/C32
G20
F20
F46
F46
G20
F46
F31
F20
G20
F44
F46
F46
G20
F46
F33
F31
F46
F33
F44
G20
F46
F46
F46/G20
F44
F44
F46

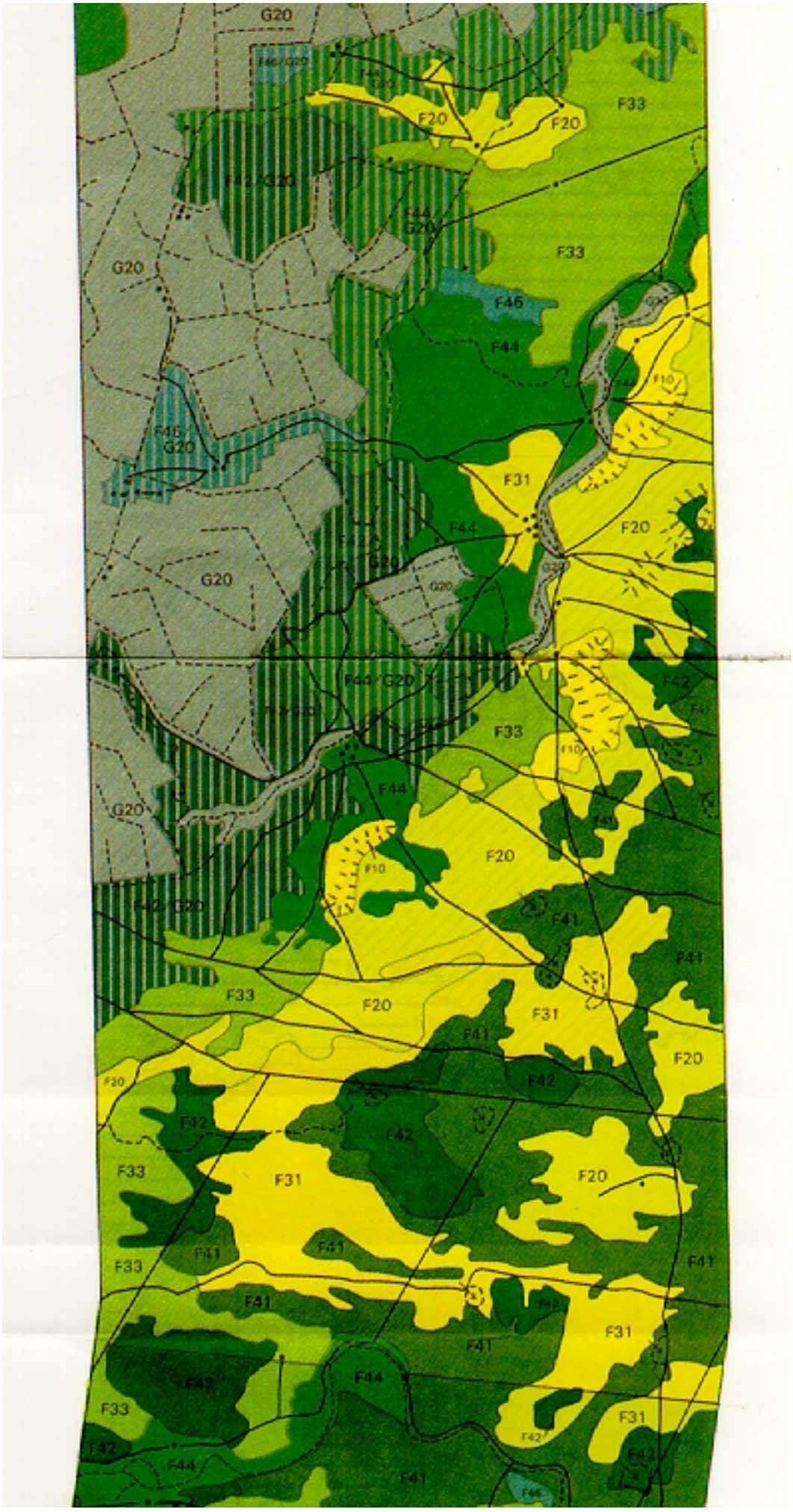
transect 3

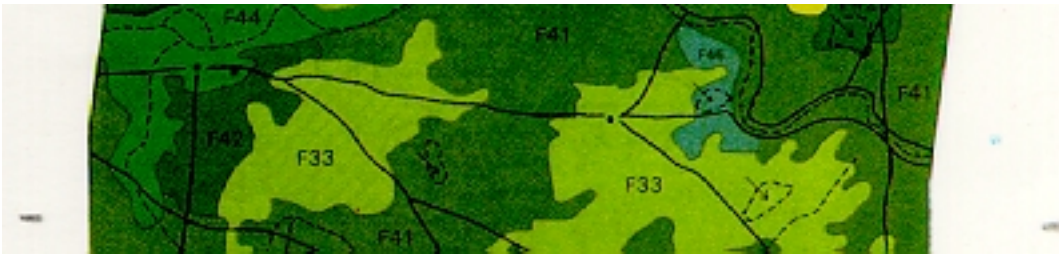
F46
F46
F45
F46/G20
G20
G20
G20
F46
F44
F44
G20
F46/G20
F44
G20
F45
F46/G20

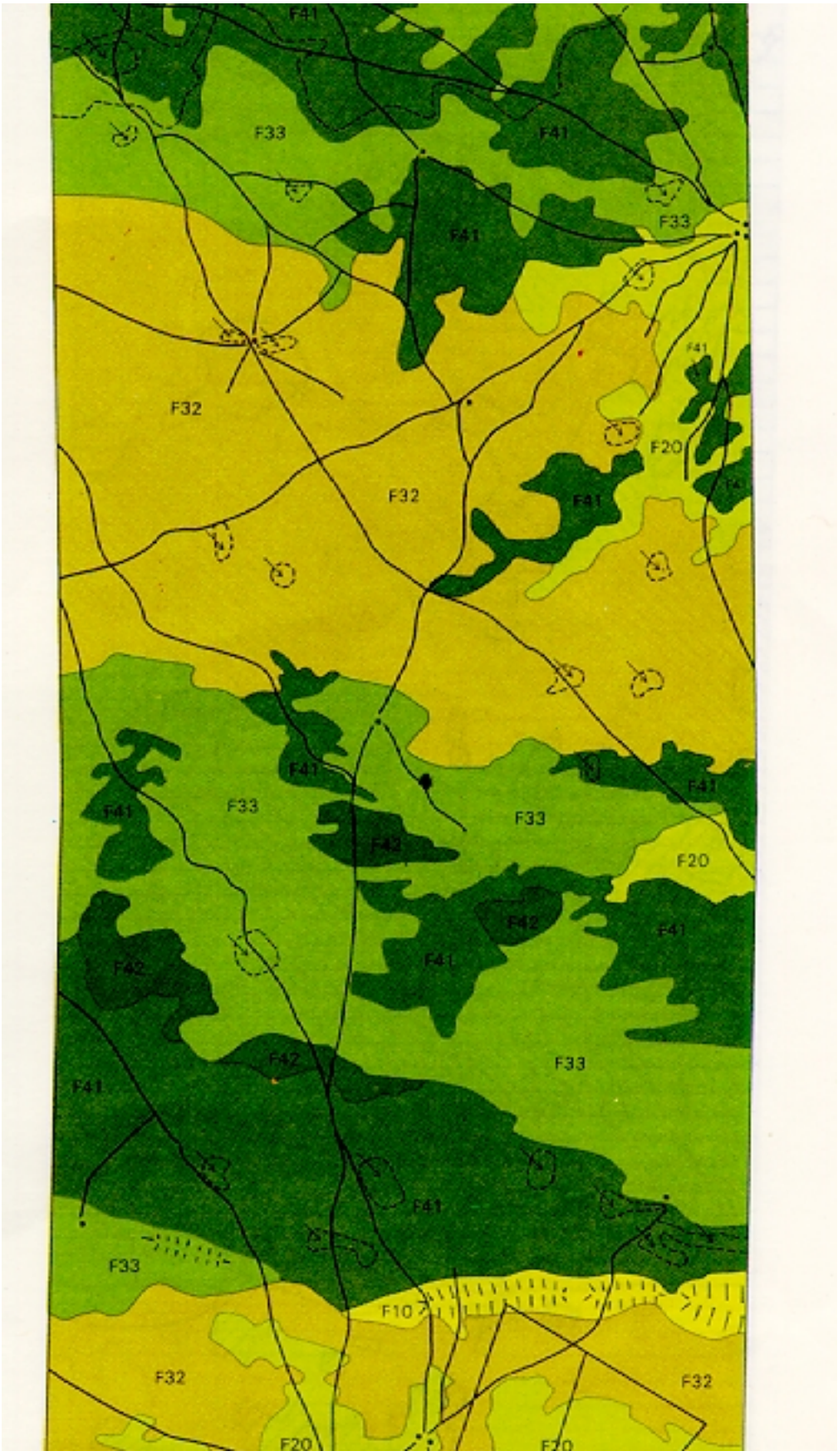
Carte de paysages semi-detaillee (Mali)
Transect 4

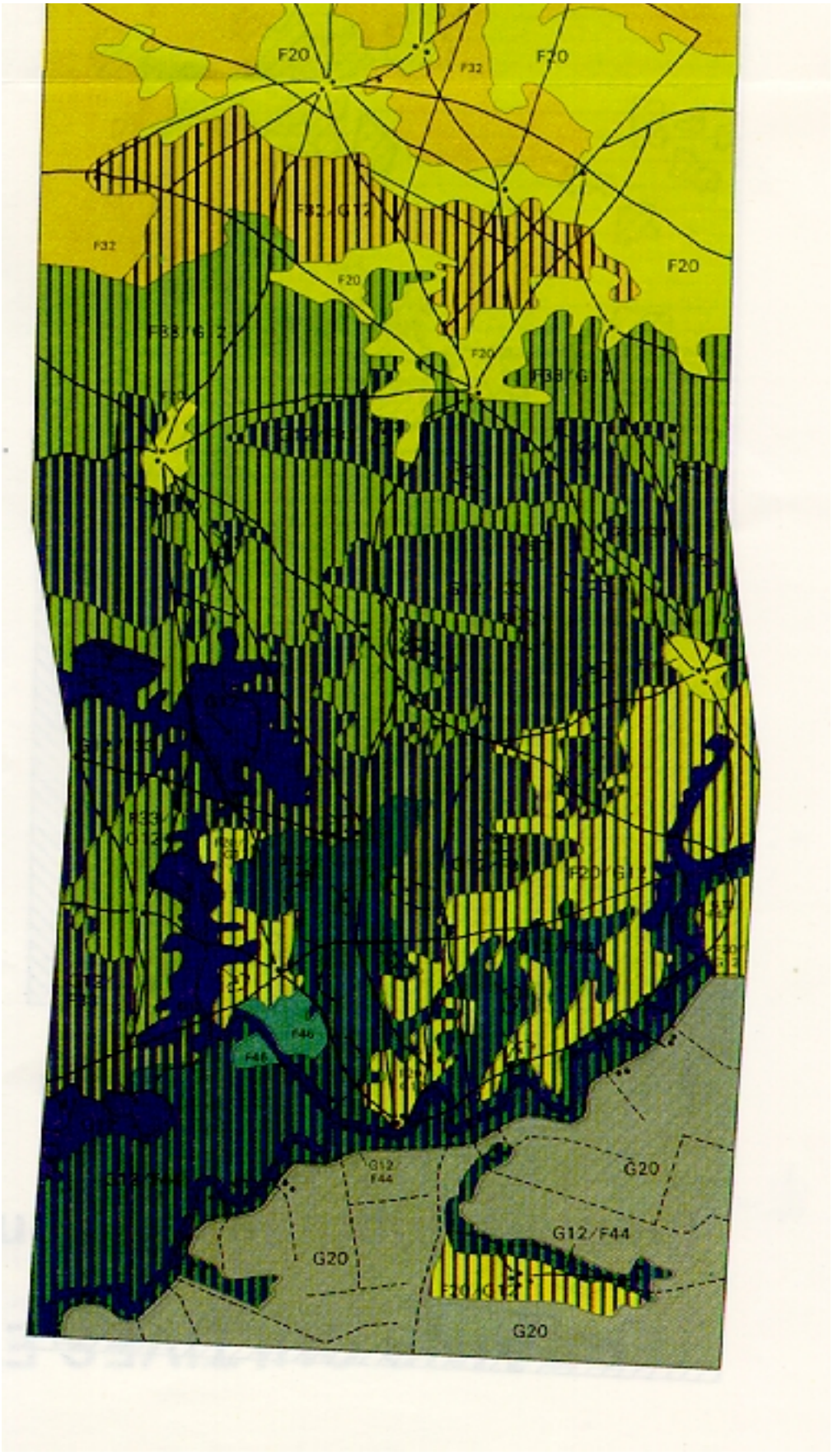


[Légende]


G20
F20
F20
F33
F42/G20
F44/G20
F33
G20
F46
F44
F46/G20
F31
F44
F20
G20
F44/G20
F42
F33
F44
G20
F20
F42/G20
F41
F41
F33
F20
F31
F41
F20
F42
F42
F42
F33
F31
F20
F41
F41
F33
F41
F41
F31
F41
F42
F44
F33
F31
F42
F42
F44
F41


F44
F41
F44
F41
F42
F33
F33
F41


F41
F33
F41
F41
F33
F41
F32
F20
F32
F41
F41
F41
F33
F33
F42
F20
F42
F41
F41
F42
F42
F41
F33
F41
F33
F10
F32
F32
F20
F20


F20
F32
F20
F32
F20
F20
F20
F20
F46
F46
G12
F44
G20
G12/F44
G20
G20

LEGENDE

GEOMORPHOLOGIE		système/unité/sous-unité	SUBSTRAT surface	texture profondeur	relief et ruissellement vu la précipitation (P) et l'infiltration (I) I ≤ P	I = P	I ≥ P	description substrat et/ou végétation	VEGETATION I ≤ P	I = P	% recouvrement strate ligneuse I ≥ P	septentrionale / méridionale	
A/D	Ensemble détritique												
A	affleurement gréseux et pentes sableuses adjacentes	LS	/	60		40	localement prairie arborée		0		15		A00
B	crête- ou colline latéritique	LS	/	90		10	presque dépourvu de végétation		0		0,5		B00
C	plateaux latéritiques						formations arbustives, très ouvertes pour les formes septentrionales						
	C1 plateau haut	LS	/	80		20	sol peu profond concrétionné à brousse tigrée		0,5		10		C11 / C12
		"	"	90		10	typique: fourrés allongés parallèles		5		50		
	C2 glacis intermédiaire	LS	LAS	70		30	sol peu profond concrétionné à brousse tigrée;		1		30		C21 / C22
		"	"	65		35	fourrés orientés et à courbure régulière		5		50		
		LS	LAS	60		40	dominance des petits fourrés irréguliers,		0,5		10		C23 / C24
		"	"	35		65	sans orientation spécifique		5		15		
	C3 pédiplaine	LAS	A	70		30	steppe arbustive		0,5		10		C31 / C32
		"	"	40		60			5		25		
	C4 pédiplaine dominée par un réseau de drainage	LAS	A	85		15	fourré du réseau de drainage dans une		0,5		50		C41 / C42
		"	"	35		65	steppe arbustive		10		25		
D	sables rouges												
	D1 dunes	S	S		100		prairie éphémère			0,5			D11 / D12
		"	"		100		prairie arborée			10			
	D2 (pédi) plaine	SL	LS	60		40	steppe à Euphorbia balsamifera		5		20		D21 / D22
		"	"		100		steppe à Guiera senegalensis			10			
E	Ensemble sablonneux éolien												
	E1 dunes longitudinales prononcées orientées	S	S	20	70	10	mosaïque des prairies éphémères (dunes) et des prairies arbustives (vallées à Acacia raddiana)		0	0,5	3		E11 / E12
		SL	SL	80		20	mosaïque des prairies arbustives (dunes) et des prairies arborées (vallées) à Combretum		5		10		
	E2 massif sablonneux haut avec des dunes peu prononcées	SL	SL		100		prairie éphémère			0,5			E20
	E3 massif sablonneux haut	SL	SL		100		prairie éphémère			0,5			E31 / E32
		"	"	50		50	prairie arbustive à Combretum glutinosum et Sclerocarya birrea		10		20		
	E4 massif sablonneux intermédiaire avec des dunes basses orientées	SL	SL	75		25	prairie arbustive à Combretum glutinosum		1		3		E40
	E5 massif sablonneux intermédiaire avec des dunes basses sans orientation spécifique	SL	SL	50		50	prairie arbustive à Combretum glutinosum		1		5		E50

	sans orientation spécifique											
E6	massif sablonneux intermédiaire	SL	SL		100		prairie arborée à Acacia raddania et Balanites aegyptiaca		0,5		E61 / E62
		..	..	75		25	prairie arborée à Sclerocarya birrea et Combretum glutinosum	10		15	
E7	plaine basse	SL	LS	20	60	20	prairie arborée à Balanites aegyptiaca	0	1	2	E71 / E72 / E73
		..	..		100		prairie arborée à Acacia raddiana, Balanites aegyptiaca et Combretum glutinosum		0,5		
		..	..		100		prairie arborée à Combretum glutinosum		5		
E8	plaine basse dominée par un réseau de drainage	LS	LS		90	10	fourré dense du réseau de drainage dans une prairie arborée		5	50	E80

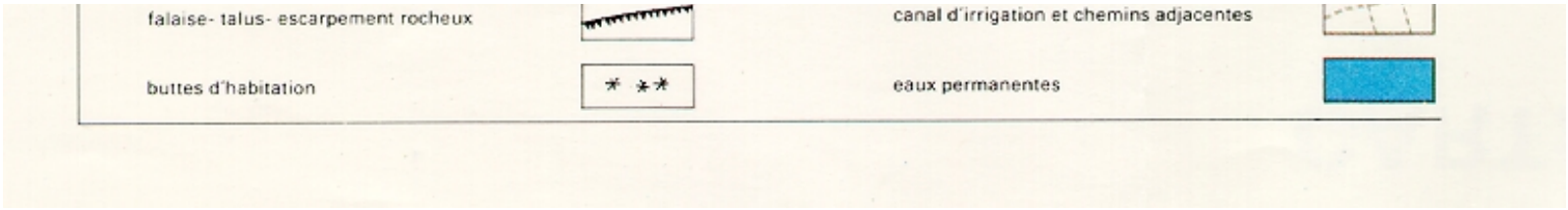
F/G Ensemble fluviatile ou lacustre

F	Delta intérieur fossile										
F1	dunes	SL	SL	90		10	prairie arborée de densité variable (dunes/vallées)	2		20	F10
F2	plaine haute	SL	LS	80		20	prairie arborée sur massif sableux épais	15		30	F20
F3	plaine intermédiaire	LS	LS	80		20	prairie arborée de densité variable sur massif sableux d'épaisseur variable	10		20	F31
		..	..	80		20	savane arborée de densité variable sur massif sableux d'épaisseur variable	15		40	F32
		LS	LAS	70		30	mosaïque des ermes et des fourrés sur plaine limoneuse à taches sablo-limoneuses de faible profondeur	5		40	F33
F4	plaine basse	LS	LA	75		25	mosaïque des ermes et des fourrés sur plaine limoneuse à dépressions argileuses	15		35	F41
		L	LA	10		90	forêt claire des dépressions argileuses du massif sableux	10		35	F42
		LS	LA	75		25	steppe arbustive sur plaine limono-argileuse	5		25	F43
		..	..	75		25	à levées alluviales	3		30	F44
		A	A	70		30	steppe sur plaine argileuse	1		5	F45
		A	A	75		25	fourré dense des dépressions argileuses hydromorphes	25		50	F46
		A	A			100	steppe des dépressions argileuses hydromorphes			7	F47
G	Delta intérieur vif										
G1	zone d'inondation	LAS	A	75		25	forêt claire sur les bordures des chenaux d'inondation	7		30	G11
		A	A			100	prairie à graminées pérennes			5	G12
G2	terrain irrigué	LAS	A			100	riziculture			1	G20

★ CLASSES TEXTURALES Symbole (FAO 1977): S = sable ; SL = sable limoneux ; LS = limon sableux ; LAS = limon argilo-sableux ; LA = limon argileux ; A = argile

TOPOGRAPHIE

ville		dunes longitudinales	
village ou hameau		pente	
route nationale		point d'eau	
piste		cuvette ou dépression occasionnellement humide ou en eau	
falaise- talus- escarpement non rocheux		lit d'oued ou cours d'eau à sec une partie de l'année	
falaise- talus- escarpement rocheux		canal d'irrigation et chemins adjacentes	


falaise- talus- escarpement rocheux
canal d'irrigation et chemins adjacentes
buttes d'habitation
eaux permanentes