

C'est le cas déjà à 200 mm sur les terrains avec une infiltration homogène. Dès que le paysage présente une certaine hétérogénéité la densité des arbres diminue aux endroits avec ruissellement et augmente aux endroits avec écoulement.

4.4.4 Estimation de l'eau disponible

Comme résumé des connaissances des parties précédentes nous avons développé une méthode simple pour estimer le bilan d'eau. La discussion dans cette partie a mis en évidence que l'on ne peut pas calculer l'eau disponible sans tenir compte de la production végétale. Dans le calcul de la disponibilité d'eau il faut inclure beaucoup de la connaissance de la production. Cette connaissance sera traitée dans les chapitres 5 et 6 de ce livre. C'est pourquoi nous éloignons la discussion du calcul de l'eau disponible à la partie 4.6 (production potentielle) et 5.5 (production actuelle). Là on présentera des méthodes simples (calcul à la main) pour mieux comprendre la production et le bilan d'eau.

4.5 LA PRODUCTION POTENTIELLE DES PATURAGES NATURELS

4.5.1 Introduction

La productivité potentielle des pâturages naturels diffère de la productivité potentielle des cultures dans des conditions de croissance optimales avec irrigation (traitée dans la partie 4.2) parce que:

- Le début de la période de croissance est déterminé fortement par l'humidité du sol, et ainsi par la pluviosité qui diffère d'une année à l'autre.
- La fin de la période de croissance est parfois atteinte parce que le sol est sec et elle est liée au temps dans ces cas. Dans beaucoup d'autres cas, la date de floraison est déterminée complètement ou partiellement par la longueur du jour, et les graminées ne croissent que pendant une période limitée après cette date (partie 4.3.4.2). Ainsi il peut donc se faire que la végétation a déjà atteint le stade de maturation bien que le sol soit encore humide et contienne assez d'éléments nutritifs.
- La vitesse de croissance maximale est parfois plus basse que celle montrée dans la fig. 4.2.1 quand les stomates sont partiellement fermés à cause d'une sécheresse temporaire.
- La composition de la végétation n'est pas déterminée par l'homme, mais par des facteurs naturels. Dans des conditions de croissance optimales, la végétation est souvent dominée par 1-2 espèces, mais ces espèces peuvent être différentes d'une année à l'autre. En général, on y trouve surtout des graminées annuelles parce qu'elles couvrent et suppriment les autres herbes et les légumineuses. Les vitesses de photosynthèse et de croissance dans des conditions optimales sont à peu près les mêmes pour toutes les graminées du type C_4 .

La situation d'un pâturage avec des graminées pérennes diffère surtout dans la première phase de croissance de celle d'un pâturage à graminées annuelles. Leurs réserves en hydrates de carbone dans le système racinaire contribuent beaucoup à la croissance initiale, qui par conséquent peut être très rapide. Mais quand la période de croissance végétative et rapide a commencé et la couverture végétale est totale, les graminées pérennes ne

diffèrent pas des graminées annuelles. Les pérennes fleurissent souvent plus tard, ce qui fait que la période de croissance potentielle est souvent plus longue, et ainsi leur productivité potentielle est plus élevée. Leurs vitesses de production journalière sont sensiblement les mêmes. Dans le projet P.P.S., on n'a pas suivi la production potentielle des herbes pérennes d'aussi près que nous l'avons fait pour celle des herbes annuelles.

La production des arbres dans des conditions optimales ne semble pas être très intéressante parce que leur production potentielle est plus basse (ce sont toutes des espèces C_3) et parce que leurs feuilles sont trop hautes pour être accessibles au bétail. Le taux d'azote et de minéraux est élevé, mais il est déjà réduit presque de moitié quand les feuilles tombent. En plus, une grande partie de leurs protéines est souvent indigeste pour le bétail (voir partie 6.1).

4.5.2 La phase exponentielle

Dans cette phase, les plantules ne s'influencent pas ou presque pas. Elle dure depuis la germination jusqu'au moment où une biomasse aérienne de 1.000-1.500 kg de matière sèche ha^{-1} est atteinte. Dans la partie nord du Sahel, toute la croissance se passe dans cette phase exponentielle parce que l'hivernage est bref. Dans le sud du Sahel aussi une partie importante de la croissance se passe dans cette phase, mais elle est suivie par une phase de croissance linéaire.

La croissance des plantes a l'air exponentielle. Quand on regarde de plus près, la vitesse relative de croissance (VRC, exprimée en g de biomasse formée g^{-1} de biomasse existante $jour^{-1}$) n'est pas une constante (comme avec une vraie croissance exponentielle), mais varie entre 0 et 0,5 $g g^{-1} jour^{-1}$ selon les conditions environnantes. Cependant, étant donné son caractère explosif, on l'appelle exponentielle. La durée de cette phase est de 40-90 jours. Au nord, le développement végétatif et la phase de reproduction se trouvent tous dans cette phase exponentielle et la croissance s'arrête avant que la phase linéaire soit atteinte. Sa durée dépend surtout du bilan d'eau (partie 4.4.3) et du photopériodisme (partie 4.3.4.2). La durée de la phase exponentielle est aussi variable dans le sud du Sahel à cause de la répartition variable des pluies et de la densité très variable des plantules.

Dans des conditions optimales, la VRC est environ 0,25-0,5 $g g^{-1} jour^{-1}$. On peut la dériver de la formule donnée dans la partie 4.2.1, avec la photosynthèse maximale des feuilles et le poids spécifique des feuilles. Ce dernier variable est environ 50 $g m^{-2}$ pour les graminées sahéliennes, bien que les plantes très jeunes montrent des valeurs de seulement 20 $g m^{-2}$. De telles VRC très élevées ont été observées dans nos expériences en chambre climatique, et sont aussi rapportées ailleurs pour des espèces C_4 et C_3 (Björkman et al., 1975). Mais vu la durée de la période entre la germination et le moment où la végétation atteint un poids de quelques centaines de $kg ha^{-1}$ et l'augmentation du poids de la biomasse dans cette période, on doit constater que la VRC n'atteint normalement pas sa valeur maximale. Dans une vingtaine des expériences sur des sols fertilisés, mais pas irrigués, au ranch, la VRC des parties aériennes était en moyenne de $0,18 \pm 0,06 g g^{-1} jour^{-1}$ pour les 20-40 jours après la germination. La cause de cette réduction importante est probablement le dessèchement temporaire, qui se passe souvent dans cette phase de

croissance, et qui est aussi la cause de la mort de beaucoup de plantules (voir partie 4.3.3.3). Une analyse plus détaillée des processus de cette situation est donnée ailleurs (Penning de Vries, 1982b). Pour les parties qui suivent, on considère que la VRC sur le terrain fertilisé est $0,2 \text{ g g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ pendant la phase exponentielle. Il va sans dire qu'il ne s'agit que d'une approximation. Sur les terrains non-fertilisés au ranch, on trouvait des VRC de $0,1 \text{ g g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ en moyenne dans cette phase exponentielle. On reviendra sur cette réduction de la VRC dans la partie 5.2. Pourtant, l'ensemble des processus de croissance et leur interaction avec l'environnement est trop peu connue, vu aussi l'hétérogénéité du micro-environnement, pour pouvoir prévoir une certaine VRC, même pour des conditions bien spécifiques. C'est pourquoi on ne peut pas encore simuler de façon réaliste la croissance dans la phase exponentielle. On a quand même donné ces observations pour montrer que la VRC peut varier énormément, et aussi pour souligner que la VRC moyenne peut être considérable quand on a l'impression, à l'oeil nu, que les plantes de 0,5-5 cm de hauteur ne croissent presque pas. La fig. 4.5.1 montre le nombre de jours qui sont nécessaires pour arriver à la phase linéaire avec une certaine VRC. Cette figure ne

Fig. 4.5.1. La relation entre la durée maximale de la phase exponentielle de croissance et la biomasse après la germination à des vitesses relatives de croissance (VRC) entre une valeur basse de 0,05 et la valeur maximale de $0,5 \text{ g g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$. Les trajets des valeurs normales de la durée de cette phase et des biomasses des parties aériennes initiales (poids de semence $\times 0,33$) sont indiqués par des flèches.

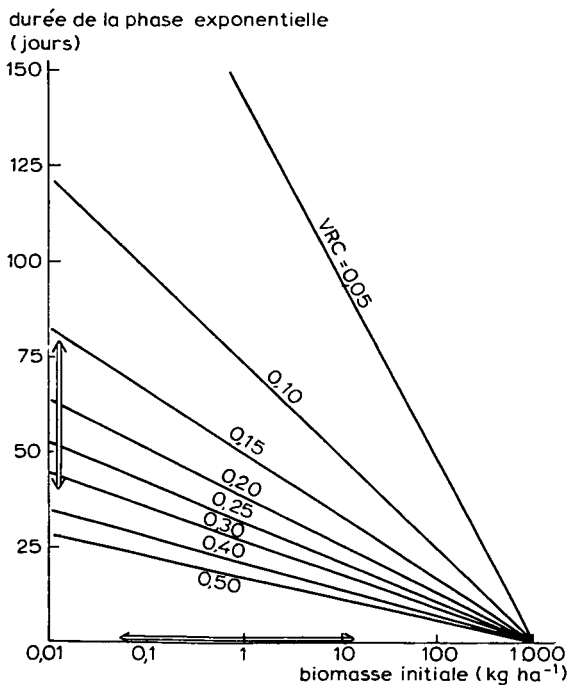


Fig. 4.5.1. The relation between the maximum duration of the exponential phase of growth and the biomass after germination at relative growth rates (VRC) between a low value of 0.05 and the maximum value of $0.5 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$. The courses of the normal values of the duration of this phase and of the biomasses of the initial aerial parts (seed weight $\times 0.33$) are indicated by arrows.

suggère pas que la VRC est une constante, mais elle peut être utilisée pour indiquer les conséquences d'une réduction de la VRC pour la durée maximale de la phase exponentielle. Etant donné que le photopériodisme est aussi un élément déterminatif dans la durée totale de la phase végétative (partie 4.3.4.2), un retard de la croissance dans la phase exponentielle se traduit en principe par un raccourcissement de la phase linéaire, et ainsi de la productivité dans des conditions nutritives optimales du sol. Quand les conditions atmosphériques changent de telle façon que les conditions de croissance deviennent optimales (partie 4.4.3), la croissance est accélérée. En supposant qu'il y a toujours au moins quelques dizaines de kg ha^{-1} de biomasse au moment de ce changement atmosphérique, on peut voir avec la fig. 4.5.1 qu'on obtient une biomasse de 1.000 kg ha^{-1} au maximum au bout d'une décade quand les conditions de fertilisation sont optimales. Nos expériences confirment cette conclusion. Voir aussi partie 4.3.3.3.

Le début de la croissance des pérennes est un processus hétérotrophe: pour la formation des repousses, elles utilisent d'abord les réserves d'hydrates de carbone, azote et les minéraux de leurs systèmes racinaires et des parties basales des tiges. Avec leurs grands systèmes racinaires encore intacts, elles sont aussi moins sensibles que les annuelles aux sécheresses au début de l'hivernage. Ceci fait que leur croissance peut être rapide pendant toute cette période où elles sont hétérotrophes. Par conséquent, elles atteignent la phase de croissance linéaire plus tôt que les annuelles se trouvant dans les mêmes conditions environnantes et ayant des densités de plantes comparables. Il n'y avait pas des observations faites sur le terrain pour confirmer cette affirmation.

4.5.3 La phase linéaire de la croissance

On appelle cette phase 'linéaire' parce que la croissance, l'augmentation de poids (exprimée par ha et par jour) est plus au moins constante. Sur le niveau de production B (partie 2.2), il manque parfois de l'eau, ce qui empêche la croissance; l'intensité du rayonnement est le facteur limitatif quand l'humidité du sol est satisfaisante. Il y a donc 2 aspects importants: l'efficacité de l'utilisation de la lumière absorbée et l'efficacité de l'utilisation d'eau. Ici on explique l'utilisation d'eau; la croissance avec la lumière comme facteur limitatif a été discutée dans la partie 4.2.

A l'utilisation d'eau il faut considérer 2 cas: le cas où il y a suffisamment d'eau et le cas où il en manque. Les processus du premier cas ont été discutés dans la partie 4.2, l'aspect principal étant le mécanisme régulateur de la concentration de CO_2 des stomates qui fonctionnent ou non. Sur les terrains irrigués avec le riz et le maïs, on a assisté à une croissance sans régulation de la concentration de CO_2 (fig. 4.2.1). Mais on a l'impression que sur les pâturages naturels, on assiste toujours à une croissance des graminées avec cette régulation. L'avantage est évident: l'eau est utilisée plus efficacement (fig. 4.2.4d), et par conséquent, le coefficient de transpiration (exprimé en $1 \text{ H}_2\text{O}$ transpirés kg^{-1} biomasse aérienne produite) est de 150-200. Ce coefficient est de 250-400 lorsqu'il n'y a pas cette régulation. Il y a 2 arguments en faveur de l'affirmation que les graminées au ranch possèdent en général ce mécanisme régulateur et il est probable que ce mécanisme est aussi opérationnel ailleurs au Sahel. Mais pour le confirmer, des recherches complémentaires sont nécessaires. Ces arguments sont:

- La mesure de la résistance des stomates des feuilles avec un pomètre indique que la résistance minimale n'était jamais inférieure à $1-2 \text{ s cm}^{-1}$, et elle augmente quand les feuilles sont mises à l'ombre. Le nombre des observations sur les espèces *Andropogon Gayanus*, *Diheteropogon hagerupii*, *Loudetia togoensis*, *Pennisetum pedicellatum* et *Schoenefeldia gracilis* était limité, ainsi on ne peut pas distinguer de petites différences possibles parmi les espèces individuelles. La seule espèce C_3 mesurée au ranch, *Borreria sp.*, avait toujours une résistance stomatique particulièrement basse ($0,5 \text{ s cm}^{-1}$). Plus d'observations sont nécessaires pour déterminer s'il s'agit d'une exception, ou si les espèces C_3 des pâturages sahéliens en général ne règlent pas leurs stomates (ce qui les amènerait à des vitesses de transpiration plus élevées et donc à des températures foliaires plus basses, ce qui est souvent avantageux pour leur photosynthèse). Toutes les observations faites sur les stomates sont traitées ailleurs (Van Keulen, 1982a).

- L'autre argument est que la vitesse de croissance des graminées au ranch, aussi avec suffisamment de l'eau dans le sol, ne dépassait jamais de $220 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ (Penning de Vries et al., 1980) comme sur le terrain irrigué (partie 4.2). On peut le comprendre avec la fig. 4.2.4b qui montre que la photosynthèse diminue avec environ 25% à cause de l'opération de ce mécanisme régulateur de CO_2 .

Il est intéressant de constater que les semences de maïs, semées sur un terrain irrigué, ont donné des plantes dont les stomates ne règlent pas la concentration en CO_2 , mais donnaient au ranch des plantes qui le faisaient quand même: on y a observé des résistances des stomates de $1-2 \text{ s cm}^{-1}$ sur de sols humides et des vitesses de croissance plus basses. Ceci confirme l'idée que le mode opératoire des stomates est induit et que ce n'est pas une caractéristique des espèces mêmes, comme constaté aussi par Louwerse (1980). Il est tentant de penser que l'induction est provoquée par une sécheresse brève, ce qui se passait quelques fois dans des pâturages naturels, mais pas sur le terrain irrigué.

Quand il manque de l'eau pour la transpiration pendant l'hivernage, les stomates se ferment par un mécanisme régulateur, dirigé par le potentiel hydrique dans la plante. Ce mécanisme, plus fort que celui dirigé par la concentration en CO_2 , est présent dans toutes les espèces des plantes supérieures. La fermeture des stomates diminue la transpiration et la photosynthèse conjointement.

Les effets des manques d'eau pendant la saison de croissance ont été étudiés par Van Keulen sur des pâturages semi-arides avec des pluies pendant la saison froide avec un modèle à simuler. Il se base sur le rapport prévisible entre la transpiration d'une végétation et sa croissance: $150-200 \text{ l kg}^{-1}$ pour des parties aériennes des graminées des pâturages naturels pendant la saison pluvieuse, le cas le plus commun. Le modèle répète pour chaque jour le calcul de la transpiration potentielle, (c'est-à-dire s'il n'y avait aucune limitation de l'eau) et aussi celui de l'absorption de l'eau par le système racinaire dans sa condition du moment et choisit la valeur minimale de ces 2. La croissance de la végétation est calculée par multiplication de la transpiration actuelle par un coefficient de l'utilisation de l'eau. Ce coefficient est égal au rapport de la croissance potentielle de la végétation (trouvée par application de la formule de la partie 4.2.1, en choisissant une valeur de $0,015 \text{ g g}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ pour le coefficient de l'entretien biochimique, et de 0,7 pour la conversion de glucose en biomasse) et la transpiration potentielle. Il n'y a pas lieu de penser que cette simulation n'est pas applicable au Sahel. Au contraire,

le modèle est basé sur des principes pédologiques, physiologiques et météorologiques qui sont valables partout. Pour illustrer la puissance de cette approche, on peut signaler que l'application de ce modèle aux situations sahéliennes avant que nous y étions, donnait déjà des résultats assez grossiers, mais encore valables (Penning de Vries et Van Heemst, 1975). Pour une explication plus approfondie de cette conception et du modèle, il faut se référer à Van Keulen (1975) et à Van Keulen et al. (1981).

Pendant la période végétative, la biomasse aérienne consiste en feuilles et en tiges en quantités à peu près égales. Il y a quand même des différences entre les espèces. Dans le temps la répartition n'est pas non plus constante. Vers la fin de leur croissance, toutes les espèces mettent en général plus d'accent sur la formation des tiges que sur celle des feuilles. Ceci est montré dans la fig. 4.2.2. Les racines sont formées surtout au début du développement de la végétation, et leur quantité n'augmente plus ou même diminue dès la floraison. De cette figure on peut dériver qu'à la fin de la saison, dans des conditions optimales, il existe un rapport d'environ 7/1 entre le poids des parties aériennes et celui des parties souterraines, c'est-à-dire qu'il y a 500-1.500 kg ha⁻¹ de racines. Un grand nombre des observations des systèmes racinaires faites au ranch sont présentées dans la partie 4.5.5.

4.5.4 *La phase de maturation*

La floraison des graminées marque le début de la dernière phase de croissance. Dans cette phase, ce sont exclusivement les inflorescences et les semences qui augmentent leur poids. Le transfert des substances organiques des tiges et des feuilles vers les inflorescences est très important. Pour les graminées pérennes, le transport des protéines et des hydrates de carbone vers le système racinaire est aussi très important (voir partie 6.1). En général, 2-3 semaines après la floraison, les graminées annuelles arrivent à la maturation malgré la présence éventuelle de l'eau dans le sol et la présence des éléments nutritifs. La photosynthèse des feuilles diminue et finit par se supprimer et la croissance des plantes s'arrête.

Les tiges des graminées qui semblent être au stade de maturation, peuvent donner des tiges secondaires dans les aisselles des feuilles quand les conditions sont encore très bonnes après cette phase de maturation. Au Sahel, on a pu constater quelques fois que ce processus prolonge effectivement la durée de la saison de croissance (tableau 4.3.8), bien qu'il s'agissait généralement des quantités basses. Des plantes sans un développement déterminé, comme les légumineuses, continuent à former des feuilles, des tiges, des fleurs et des semences conjointement après le début de la floraison, et elles arrêtent leur croissance seulement quand le sol devient sec.

4.5.5 *Les systèmes racinaires*

Les racines absorbent de l'eau, de l'azote (N) et des minéraux. Pour la production potentielle, le sujet de ce chapitre, l'absorption de l'eau est la plus intéressante; l'absorption de N et des minéraux sont les processus clés pour la production actuelle. Pour des raisons de cohérence, toutes les informations concernant les aspects expérimentaux

taux et théoriques des systèmes racinaires des végétations annuelles sont traitées ici.

Les résultats présentés nécessitent une présentation brève de la méthode suivie pour les obtenir. La densité des racines a été mesurée par compter le nombre des racines qu'on trouve dans 10 cm^3 de sol. A cet effet, des trous ont été faits d'une superficie de $0,5 \times 1,0 \text{ m}$ et $1,3 \text{ m}$ de profondeur. Dans les 4 côtés, on a enlevé très prudemment 10 cm^3 du sol à des profondeurs fixes, et compté les racines qui restent sur place. La structure faible du sol permet l'utilisation de cette procédure directe et simple. Les nombres rapportés sont les moyennes de ces 4 observations. Les racines dans les couches supérieures (0-25 cm) vont dans toutes les directions, et les racines plus profondes vont presque toutes verticalement. C'est pourquoi le nombre de racines par 10 cm^3 est multiplié

Fig 4.5.2. La distribution des racines dans un sol argileux au ranch, exprimée comme densité (partie a) et poids (partie b) en fonction de la profondeur. Les observations concernent la végétation de *Diheteropogon hagerupii* près du moment de la floraison dans une expérience de fertilisation; o témoin, ∇ N 30 kg ha^{-1} , Δ P 30 kg ha^{-1} , \times N 30 kg ha^{-1} et P 10 kg ha^{-1} , \square N 100 kg ha^{-1} et P 30 kg ha^{-1} .

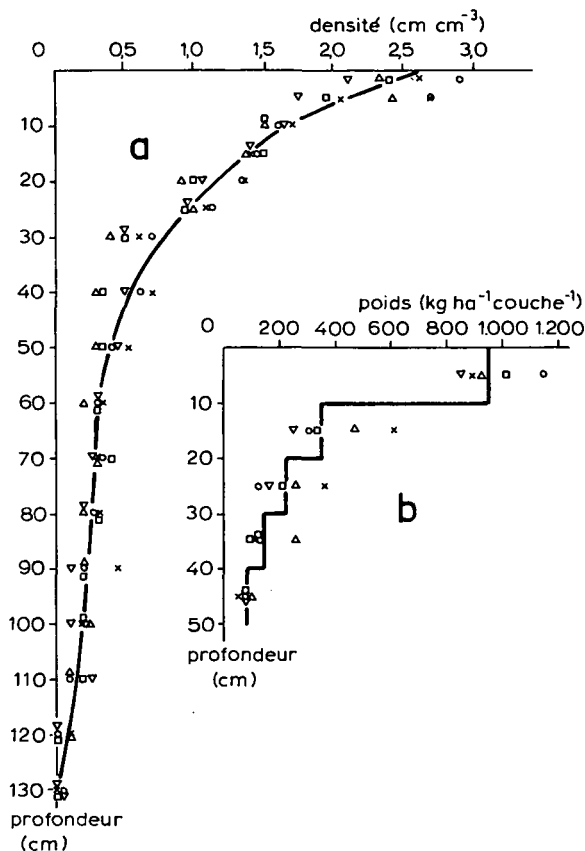


Fig. 4.5.2. Distribution of roots in a clay soil on the ranch, expressed as density (part a) and weight (part b) as a function of the depth. The observations concern a *Diheteropogon hagerupii* vegetation near the point of flowering in a fertilization experiment; o control, ∇ N 30 kg ha^{-1} , Δ P 30 kg ha^{-1} , \times N 30 kg ha^{-1} et P 10 kg ha^{-1} , \square N 100 kg ha^{-1} et P 30 kg ha^{-1} .

par 0,15 dans la couche supérieure pour arriver à la densité exprimée en cm cm^{-3} , et le nombre des racines en bas par 0,1. Des poids du système racinaire ont été déterminés dans des volumes de sol d'une superficie de $0,5 \times 1,0 \text{ m}$ et de 5 couches de 10 cm d'épaisseur. Le sol était prélevé sur les 4 côtés du trou. Le lavage du sol et la récupération des racines avec des tamis étaient directs, complets et sans complications. La fraction des grains de sol joints aux racines était faible: moins que 10% de la matière collectionnée.

La fig. 4.5.2 montre un exemple typique des résultats obtenus sur un sol argileux (D1) au ranch, et la fig. 4.5.3 les montre pour un sol sablonneux (S2). Les résultats de plusieurs expériences de fertilisation sont inclus, et il est intéressant de constater que ni la densité, ni le poids par couche, ni leur distribution ne changent d'une façon significative. La similitude des résultats sur les 2 sols est aussi frappante.

Fig. 4.5.3. La distribution des racines dans un sol sablonneux au ranch, exprimée comme densité (partie a) et poids (partie b) en fonction de la profondeur. Les observations concernent une végétation de *Schoenefeldia gracilis* près du moment de la floraison, dans une expérience de fertilisation: \square témoin, \times , \circ , et Δ N 300 kg ha^{-1} et P 30 kg ha^{-1} .

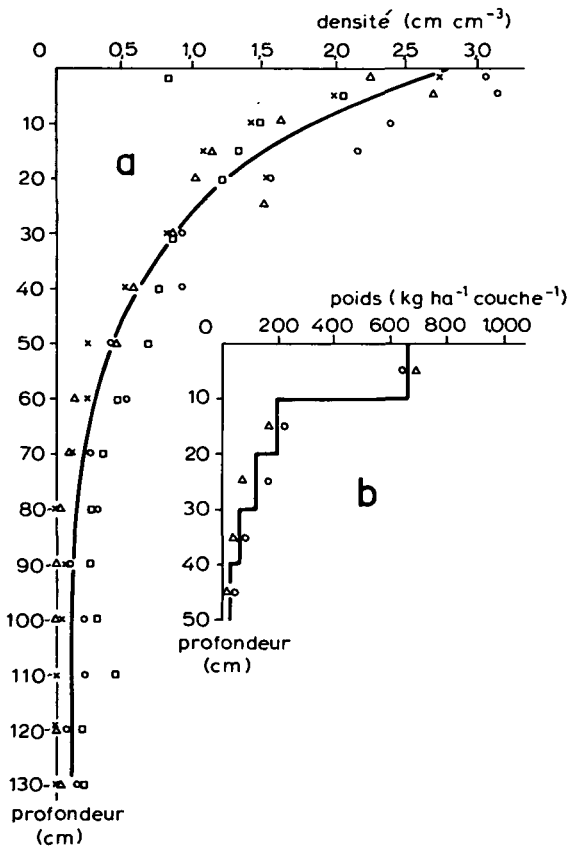


Fig. 4.5.3. Distribution of roots in a sandy soil on the ranch, expressed as density (part a) and weight (part b) as a function of the depth. The observations concern a *Schoenefeldia gracilis* vegetation near the point of flowering in a fertilization experiment: \square control, \times , \circ , and Δ N 300 kg ha^{-1} et P 30 kg ha^{-1} .

La conductivité élevée du sol pour l'eau fait que l'eau absorbée dans quelques jours par les racines individuelles vient d'un cylindre avec un rayon de plusieurs cm. Les racines peuvent donc déjà absorber l'eau efficacement à une densité d'environ 0,1-0,3 cm cm⁻³. Souvent, il y a plus de racines, mais ceci n'augmente guère l'exploitation du sol. Seulement quand le sol est assez sec, le cylindre dont les racines absorbent de l'eau est réduit. Malgré le fait que la plupart des racines se trouve dans la couche supérieure (fig. 4.5.2 et 4.5.3), il est clair que la densité des racines jusqu'à 70-90 cm ou plus suffit pour l'extraction rapide et complète de l'eau. En-dessous de cette profondeur, il y a encore des racines qui peuvent exploiter l'eau disponible au moins pour une bonne part. Plusieurs fois on a constaté aussi que quelques racines descendent jusqu'à 200 cm ou plus si le sol y est humide. La vitesse de croissance de telles racines est environ 5 cm jour⁻¹ dans le sens vertical, ce qui permet aussi aux graminées annuelles l'exploitation de tout le sol humide quant à l'eau. On peut donc conclure que toute l'eau infiltrée dans le sol à l'exception de l'eau retenue au point de flétrissement (partie 4.4.2.5) est vraiment disponible pour les plantes. La question si l'eau disponible est vraiment utilisée par les plantes dépend d'autres facteurs.

La densité nécessaire pour exploiter complètement le sol quant au nitrate est du même ordre que la densité nécessaire pour l'eau (Van Keulen et al., 1975), mais elle est une dizaine de fois plus grande pour l'absorption du phosphore (P), l'élément minéral clé. On peut déjà s'imaginer avec les fig. 4.5.2 et 4.5.3 que les couches supérieures du sol sont exploitées complètement quant à l'eau et le N, mais partiellement pour le P. Cette situation est très commune probablement; on revient sur ces remarques ci-dessous et dans la partie 5.4.4.

Les fig. 4.5.2 et 4.5.3 montrent la distribution du poids des systèmes racinaires avec la profondeur au moment de son étendue maximale: la floraison. Environ 60% du poids total se trouve dans la couche de 0-10 cm et 80% dans la couche de 0-20 cm. La biomasse des systèmes racinaires à ce moment était en moyenne de 1.300 kg de matière sèche ha⁻¹ dans nos expériences au ranch, avec une CV de 30% (voir partie 2.4). Des conclusions semblables concernant la quantité et la distribution des racines ont été tirées par Le Grand (1979), qui faisait une étude approfondie des systèmes racinaires des végétations annuelles au Sahel voltaïque. Selon lui, la distribution du poids des racines peut être décrite généralement avec la formule:

$$\ln r = a \times p + b \quad (\text{formule 4.5.1})$$

dans laquelle r est égale à la quantité des racines (en mg 1.000 cm⁻³), p à la profondeur (en cm) et a et b sont des constantes. Selon le type du sol, a varie de -0,02 à -0,08, et b de 5,4-7. Selon cette formule, la biomasse racinaire totale (kg ha⁻¹) est égale à:

$$-e^b \times a^{-1} \times 0,1 \quad (\text{formule 4.5.2})$$

(e est la base du logarithme naturel).

Dans nos expériences au ranch, la biomasse des racines n'était pas une fonction de la biomasse aérienne. Même dans le cas où la biomasse aérienne était augmentée de 2.000

kg ha⁻¹ à 9.500 kg ha⁻¹ par fertilisation, les quantités des racines étaient presque pareilles dans les 2 situations (les symboles × et □ dans la fig. 4.5.2), et aussi la distribution des racines ne change guère. La quantité des racines et sa distribution montrent donc une grande résilience. Pendant que la biomasse des racines n'est que 10-20% de la biomasse totale à la productivité potentielle, elle est de 30-50% de la biomasse à la productivité actuelle. Cette observation semble contraire à ce que la littérature montre (par exemple Le Grand, 1979), où l'on constate que le rapport biomasse aérienne et biomasse souterraine est constante. Mais dans ces cas, plusieurs espèces à des biomasses aériennes différentes ont été comparées; dans nos expériences on compare quelques espèces semblables à des niveaux de fertilité du sol très différents. La hypothèse est donc formulée ici que la biomasse des racines formée par an est une fraction constante de la production totale pour plusieurs espèces à un certain niveau de la fertilité du sol, mais que la productivité souterraine n'est pas affectée par une modification de la fertilité du sol et toute l'augmentation de la biomasse par fertilisation se retrouve dans la partie aérienne.

Des observations de la quantité des racines à des productivités aériennes inférieures à 1.500 kg ha⁻¹ an⁻¹ au Sahel ont été faites par Bille (1977) et Le Grand (1979). Ils trouvent que les racines forment 50-80% de la biomasse totale. Probablement il s'agissait souvent des cas avec des pluviométries plus faibles où la quantité des racines mortes était encore considérable. Pour les calculs qui suivent on suppose que la biomasse des racines formée par an est égale à 30-50% de la biomasse totale des plantes sur des sols naturels.

La fig. 4.5.4 montre l'évolution cours du poids total des racines d'une végétation annuelle de *Diheteropogon hageruppi* sur un sol argileux pendant une année. La diminution du poids après la floraison ou la maturation de la végétation est de l'ordre de 20-50% du poids total. Le reste des racines des annuelles décompose probablement dans l'hivernage prochain quand le sol redevient humide, comme indiqué schématiquement dans la figure. Tandis qu'il n'est pas exclu qu'une partie des racines existe pour quelques années, nous estimons sur base des observations visuelles des racines au ranch que presque toutes les racines sont décomposées dans une année après leur information. Le Grand et Bille confirment l'existence d'une diminution importante du poids à la fin de l'hivernage. Ces auteurs suggèrent que la fraction relativement grande que les racines forment de la biomasse totale à condition d'une pluviométrie plus faible, indique que la décomposition des racines y prend plusieurs années.

Le rapport poids/densité des racines n'est pas constant, comme on peut constater par la comparaison des parties a et b des figs. 4.5.2 et 4.5.3. Il y a 2 causes: les racines dans la couche de 0-10 cm ont un taux de matière organique d'environ 20% et celles situées plus bas un taux d'environ 10%, et les racines plus profondes sont plus fines. Les diamètres moyens des racines de ces figures sont calculés et les résultats sont présentés à la fig. 4.5.5. Les observations sur l'argile ont été faites dans une végétation pure de *Diheteropogon hageruppi* et dans une végétation dominée par *Schoenefeldia gracilis* sur le sable. Fig. 4.5.5 montre que ces espèces diffèrent d'une façon considérable: *Schoenefeldia* a des racines environ 30% plus fines. Ceci ne semble pas être important, mais il en résulte que la dernière produira un système racinaire presque 2x plus extensif que *Dihete-*

Fig. 4.5.4. L'évolution du poids du système racinaire d'une végétation de *Diheteropogon hagerupii*, une graminée annuelle, sur un sol argileux au ranch. Quelques observations sont faites en simple (×), d'autres (dont la moyenne et la déviation standard sont indiquées) en 9 répétitions. La figure montre la décomposition des racines formées au cours de l'hivernage de 1977 au début de l'hivernage de 1978, et la décomposition partielle des nouvelles racines à la fin de la saison pluvieuse de 1978.

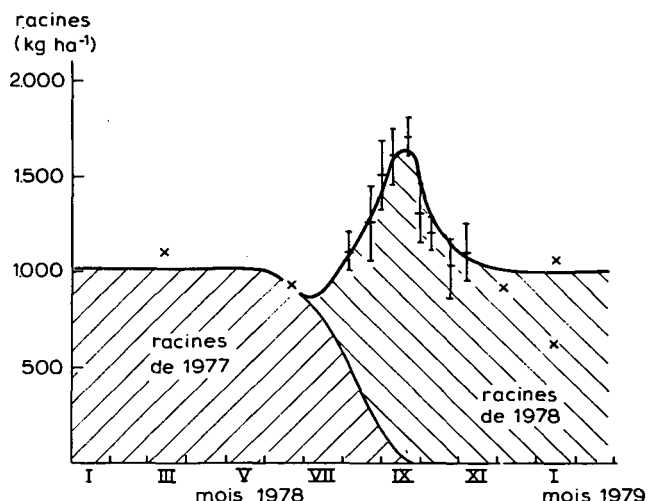


Fig. 4.5.4. The evolution of the weight of the root system of a vegetation of *Diheteropogon hagerupii*, an annual grass, on a clay soil on the ranch. Some observations were made once (×), others (whose mean and standard deviation are indicated) in 9 repetitions. The figure shows the decomposition of the roots formed in the rainy season of 1977 at the beginning of the rainy season of 1978, and the partial decomposition of the new roots at the end of the 1978 rainy season.

Fig. 4.5.5. Le diamètre moyen des racines d'une végétation pure de *Schoenefeldia gracilis* (×) sur le sable et de *Diheteropogon hagerupii* (o) sur l'argile en fonction de la profondeur. Les observations sont faites au moment de la floraison.

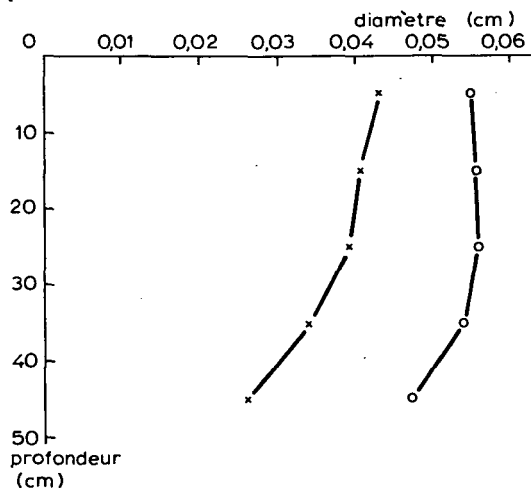


Fig. 4.5.5. Mean diameter of roots of pure vegetation of *Schoenefeldia gracilis* (×) on sand and of *Diheteropogon hagerupii* (o) on clay as a function of the depth. The observations were made at the moment of flowering.

ropogon avec le même poids de biomasse. Les différences de diamètres, calculées de fig. 4.5.2 des racines de *Diheteropogon* à des régimes de fertilisation différents sont petites à l'exception d'une carence sévère en N: dans ce cas les racines sont plus fines. Mais en général, ces résultats confirment l'idée que le diamètre des racines est lié plus fortement à l'espèce qu'aux conditions d'environnement. Il n'y a pas des observations qui prouvent que le type de sol n'a pas influencé le résultat de la fig. 4.5.5.

Pour l'analyse de la réduction de la vitesse de croissance relative au début de l'hivernage (partie 4.5.2), on a examiné aussi les systèmes racinaires des plantules. Après la germination, les plantules forment des racines de 5-15 cm de longueur dans 1-3 jours seulement. Ces racines ne sont que très fines, du moins pour les graminées avec des semences légères (tableau 4.3.1). Les racines sont presque sans ramifications. Leur diamètre est environ de 0,007-0,02 cm, et elles contiennent généralement 2-4 vaisseaux de xylème d'un diamètre de 20-35 μm . Les plantules de dicotylédones, avec des semences plus lourdes, développent des racines primaires plus épaisses (0,02-0,06 cm) avec un grand nombre (50 ou plus) des vaisseaux très étroits (10-20 μm). Pour transporter l'eau par ces vaisseaux à une vitesse de transpiration élevée, comme au début de l'hivernage, les plantules développent un gradient du potentiel hydrique considérable. Ceci peut causer la fermeture partielle des stomates, et donc contribuer à la réduction de la croissance. Une analyse détaillée sera publiée ailleurs (Penning de Vries, 1982b).

Comme déjà indiqué, les racines individuelles absorbent de l'eau et du nitrate d'une volume du sol assez grande, mais le P absorbé par les racines vient d'un cylindre étroit avec un rayon de 0,1-0,3 cm. Un certain système des racines peut donc permettre l'exploitation complète du sol quant à l'eau et le nitrate et en même temps l'exploitation partielle concernant le P. Dans la partie 5.4.5 on discute les implications de cette situation, qui est probablement très commune pour les végétations sahéliennes. Pour voir ici comment la densité des racines contribue à l'exploitation du sol en fonction de l'épaisseur de la couche exploitée autour chaque racine, et comment la densité est liée au poids total des racines, la fig. 4.5.6 est construite sur base des considérations mathématiques. (Un pourcentage constant de 10% de la matière sèche dans les racines a été employé). La figure montre les nombres des racines nécessaires pour exploiter complètement le sol dans des conditions où la zone d'influence des racines s'étend de 0-1 cm. La figure montre aussi les combinaisons de densité et le diamètre des racines qui correspondent à des quantités de 10-1.000 kg ha^{-1} par couche de 10 cm. La figure peut être utilisée pour obtenir une première indication du degré de l'exploitation du sol dans des conditions différentes. Par exemple, dans la fig. 4.5.6 la surface hachurée à gauche de l'intersection de la ligne représentant toutes les combinaisons de diamètre et de densité à un poids total de 1.000 kg ha^{-1} et la ligne représentant une épaisseur exploitée autour de chaque racine de 0,1 cm, montre les cas où le sol est complètement exploité; la surface à droite de cette intersection représente les cas où le sol n'est exploité que partiellement.

A l'aide de la fig. 4.5.6, on peut donc déduire les densités minimales qui sont nécessaires pour un certain degré d'exploitation du sol. Minimale, parce on a supposé pour la construction de cette figure que les racines s'évitent, c'est-à-dire que les racines n'exploitent jamais plusieurs fois le même volume quand il en reste encore. Ceci n'est

Fig. 4.5.6. Les lignes continues et discontinues dans la figure représentent les relations entre le nombre des racines cm^{-3} (échelle logarithmique) et le diamètre de ces racines (échelle linéaire) dans plusieurs situations. Tous les points d'une ligne continue correspondent avec une valeur fixe de la biomasse du système racinaire, mais à des combinaisons différentes de diamètre des racines individuelles et leur nombre cm^{-3} . Les 3 lignes correspondent à des biomasses de 10, 100 et 1.000 kg ha^{-1} dans une couche de 10 cm de profondeur. Chaque ligne discontinue représente la densité minimale pour exploiter complètement le volume du sol à des diamètres différents. Pour explication voir texte. Les 6 lignes correspondent avec des épaisseurs de la couche exploitée autour de chaque racine individuelle de 1,0, 0,5, 0,25, 0,1, 0,01 et 0,0 cm. A côté des axes sont indiqués les densités et les diamètres souvent rencontrés au ranch. Le point * au milieu est expliqué dans la partie 5.4.5.

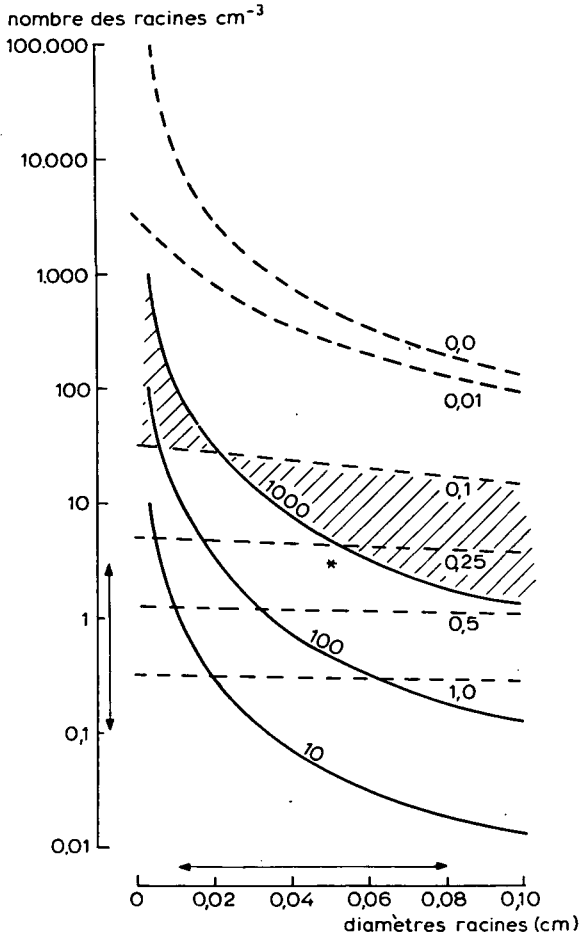


Fig. 4.5.6. The continuous and discontinuous lines in the figure represent the relations between the number of roots cm^{-3} (logarithm scale) and the diameter of these roots (linear scale) in several situations. All the points of a continuous line correspond to a fixed value for the biomass of the root system, but at some different combinations of the diameter of the individual roots and their number cm^{-3} . The 3 lines correspond to biomasses of 10, 100 and 1000 kg ha^{-1} in a layer 10 cm thick. Each discontinuous line represents the minimum root density for completely exploiting the volume of soil at different root diameters. See text for explanation. The 6 lines correspond to the thicknesses of the layer exploited around each individual root of 1.0, 0.5, 0.25, 0.1, 0.01, and 0.0 cm. Alongside the axes the densities and diameters often encountered on the ranch are indicated. The point * in the middle is explained in part 5.4.5.

probablement pas vrai. A des densités faibles, les racines ne se gênent pas. Mais si leur densité est élevée et que les racines individuelles poussent indépendamment, quelques parties des racines sont proches, et exploitent le même volume de sol. Cette diminution de

l'efficacité des racines par exploitation multiple d'un volume fait que seulement 50% du sol est vraiment exploité à une densité (à une coupe transversale) de $0,65 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$, 80% à $1,6 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$, 90% à $2,4 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ et 95% à $3,0 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ tandis que le sol est déjà exploité complètement à $1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ dans la fig. 4.5.6. Mais aussi avec cette précision, il sera évident que la figure est une simplification, parce que les zones dont les racines individuelles absorbent leurs nutriments, ne sont pas délimitées exactement, et sont une fonction de l'activité biologique de la racine, des conditions physiques et chimiques du sol et de la durée de l'absorption. Pourtant, la figure montre la façon dont on pense que les aspects de densité, diamètre et poids sont liés à l'exploitation du sol.

4.5.6 Evaluation et utilisation du modèle à simuler

Le modèle SAHELGRASS, basé sur ARID CROP II de Van Keulen et al. (1981) simule la croissance dans les phases végétatives et reproductives d'une végétation de graminées annuelles. Aussi, il simule le bilan d'eau du sol parallèlement à la croissance des plantes. La simulation avance dans le temps avec des intervalles de calcul d'une journée. Les points les plus importants sur lesquels ce modèle diffère de ARID CROP II sont: l'effet du photopériodisme, l'écoulement d'eau et l'interception de la pluie par la végétation. SAHELGRASS est décrit ailleurs (Van Keulen, 1982b; Stroosnijder, 1982b).

Pour évaluer le comportement de ce modèle pour des situations au Sahel, il est utilisé pour simuler quelques situations qui correspondaient avec les conditions des expériences. Une dizaine d'expériences seront simulées sur des types de sol sablonneux, argileux et dans des années avec des quantités de pluies et des distributions différentes (1976, 1977, 1978, 1979). Dans les expériences, on a observé la croissance de la quantité des parties aériennes et des racines et aussi les quantités d'eau dans le sol à des profondeurs et moments différents. Les fig. 4.5.7a-d montrent les résultats de telles simulations. Le degré de similitude entre simulation et observation est grand, et confirme notre conviction que les aspects clés des processus de la croissance, du bilan d'eau du sol et de la relation transpiration-croissance sont bien compris d'une façon quantitative. Pour le moment, la partie la plus faible de ce modèle est là où l'on simule la croissance dans la phase exponentielle. La raison est que dans cette phase il y a souvent des périodes sèches où les plantes souffrent fortement ou même meurent. La physiologie de survivre dans de telles conditions n'est pas encore suffisamment connue pour pouvoir la simuler d'une façon satisfaisante (voir aussi partie 4.3.3.3). Le modèle a été employé dans la partie 5.2.3 pour déterminer le niveau de la productivité potentielle dans des expériences avec des doses différentes d'engrais.

Les données à spécifier pour de telles simulations ne sont pas très nombreuses; elles sont indiquées dans le tableau 4.5.1. Il va sans dire que les résultats du modèle sont sensibles à la valeur spécifique du coefficient de ruissellement, un paramètre qui est difficile à estimer avec une précision supérieure à 20% sans observations sur les lieux.

Notez dans la fig. 4.5.7 que la productivité potentielle au ranch n'est pas du tout

Fig. 4.5.7. L'évolution de la biomasse des végétations naturelles au ranch qui poussent sans carence en azote et en minéraux, mais avec des pluies naturelles. Les points indiquent les récoltes des parcelles individuelles, les lignes sont les résultats des simulations avec le modèle à simuler détaillé. Fig. a: sol argileux avec 13% d'écoulement, et une végétation à *Diheteropogon hagerupii* en 1976; fig. b: le même cas en 1978; fig. c: sol sablonneux (S2) avec 24% de ruissellement, végétation à *Schoenefeldia gracilis* en 1977; fig. d: sol sablonneux (S1) avec 40% de ruissellement et plusieurs espèces de graminées annuelles en 1978.

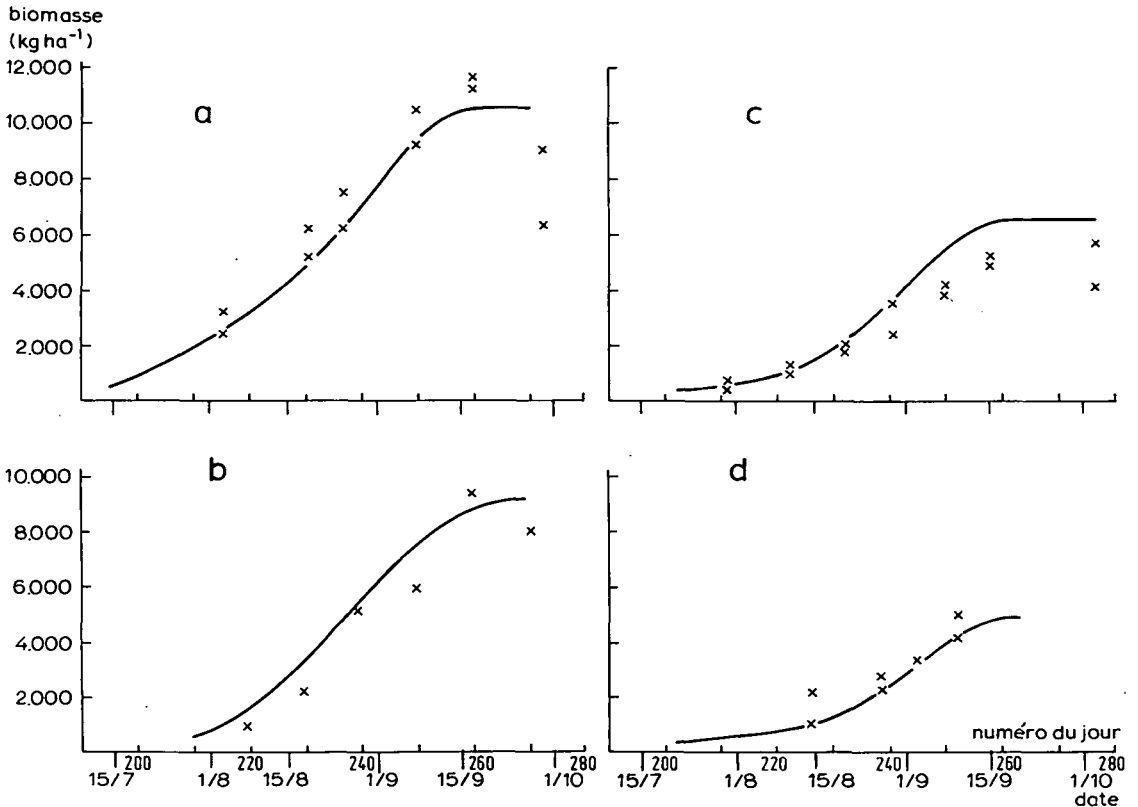


Fig 4.5.7. The evolution of the biomass of the natural vegetations on the ranch which grow without deficiencies of nitrogen or minerals, but with natural rainfall. The points indicate the yields of individual plots, the lines are the results of the simulations with the detailed simulation model. Fig. a: clay soil with 13% run-off, and a vegetation of *Diheteropogon hagerupii* in 1976; fig. b: the same case in 1978; fig. c: sandy soil (S2) with 24% run-off, vegetation of *Schoenefeldia gracilis* in 1977; fig. d: sandy soil (S1) with 40% run-off and several species of annual grasses in 1978.

constante, mais elle varie d'une année à l'autre, d'un sol à l'autre et qu'elle est très sensible au ruissellement. Un autre exemple le montre également: la productivité potentielle simulée à Nampala, 100 km au nord du ranch avec une pluviométrie annuelle moyenne de 400 mm et des sols sablonneux (avec un ruissellement de 18%) varie déjà avec un facteur 3 dans 3 années successives (tableau 4.5.2.) En effet, situé plus dans le nord du Sahel, les pluies sont plus variables (partie 3.2.2) et la productivité est plus variable. Mais aussi: le plus difficile d'y appliquer le modèle à simuler existante.

Pour obtenir une première impression de la productivité potentielle d'un terrain, il

Tableau 4.5.1. Liste des variables à spécifier pour l'utilisation du modèle SAHEL.GRASS. Les variables de la catégorie 1 doivent toujours être fournies. Celles de la catégorie 2 doivent être ajoutées si l'on simule des expériences spécifiques. Les variables de la catégorie 3 sont nécessaires en plus pour des simulations précises.

Catégorie	Sol	Plante	Météo	Divers
1	point de flétrissure, capacité au champs, fraction écoulement	mécanisme de photosynthèse C ₃ ou C ₄ ; régulation sur CO ₂ oui ou non; largeur des feuilles	précipitation journalière; radiation totale globale, journalière	latitude
2	caractéristique de l'évaporation du sol	résistance minimale des stomates; rapport poids-superficie des feuilles; photosynthèse en relation avec la température pour les espèces C ₃ ; photopériodisme	température et humidité de l'air maximale et minimale par jour, vent journalier	-
3	humidité du sol au début de la simulation	vitesse de redressement des processus physiologiques après un manque d'eau sévère	-	-

Table 4.5.1. List of variables to be specified for the utilization of the SAHEL.GRASS model. The variables of category 1 must always be supplied. Those of category 2 must be added if specific experiments are simulated. The variables of category 3 are needed in addition, for accurate simulations.

Tableau 4.5.2. La productivité potentielle simulée dans 3 années successives à Nampala.

Année	Productivité potentielle (kg ha ⁻¹)	Pluviométrie hivernage (mm)
1976	3.500	298
1977	1.300	91
1978	3.700	220

Table 4.5.2. The simulated potential productivity of 3 successive years at Nampala.

n'est pas nécessaire de connaître tous les paramètres très précisément, et de faire les calculs chaque jour. Un modèle à simuler simple, dérivé du modèle décrit ici, est présenté dans la partie 4.6.

4.6 UN MODELE SIMPLE DE LA PRODUCTION POTENTIELLE

4.6.1 Introduction

Une bonne méthode pour intégrer beaucoup des connaissances de ce chapitre est de composer un schéma de calcul pour la croissance. Un tel schéma dans une forme très détaillée et dans lequel les résultats sont calculés à l'aide d'un ordinateur était déjà présenté très brièvement dans les parties 2.3, 4.2 et 4.5. Ce modèle de simulation, développé pour pouvoir calculer la production potentielle, était utilisé surtout pour le progrès de la recherche fondamentale. Le schéma présenté ici donne, malgré un grand nombre de simplifications et d'approximations concernant les processus les plus importants (production, bilan d'eau), des résultats semblables à ceux que donne le modèle détaillé de simulation.

Pour le schéma de calcul présenté ci-dessous on n'a besoin que d'une machine à calculer simple. Ce schéma sert d'abord comme moyen d'exercice pour le lecteur avec lequel il peut se familiariser avec beaucoup de connaissances, de considérations et de points douteux, présentés amplement dans les chapitres précédents. Ces informations sont utilisées ici dans une forme très simple, mais l'avantage en est que d'un seul coup d'oeil le lecteur a presque tous les points clefs ensemble qui déterminent la croissance. En plus le lecteur peut s'exercer à l'approche quantitative qui est typique pour la recherche rapportée dans ce livre.

Un deuxième but de ce modèle simple est de servir le lecteur un moyen pour qu'il puisse lui-même déterminer la sensibilité des calculs pour une variation dans un des paramètres. Cela peut nous indiquer le facteur ou le processus, auquel les résultats sont le plus sensible. Ainsi on sait pour quel facteur il vaut la peine d'investir du temps et de l'argent pour essayer d'obtenir de meilleures connaissances par des observations ou des mesures sur le terrain. Ce dernier aspect joue un rôle important dans la reconnaissance des possibilités d'une zone et sera traité séparément dans le chapitre 7.

L'unité du temps avec laquelle les calculs sont faits est une période de 10 jours (décade). Un nombre de calculs doit donc être répété pour des décades consécutives pen-