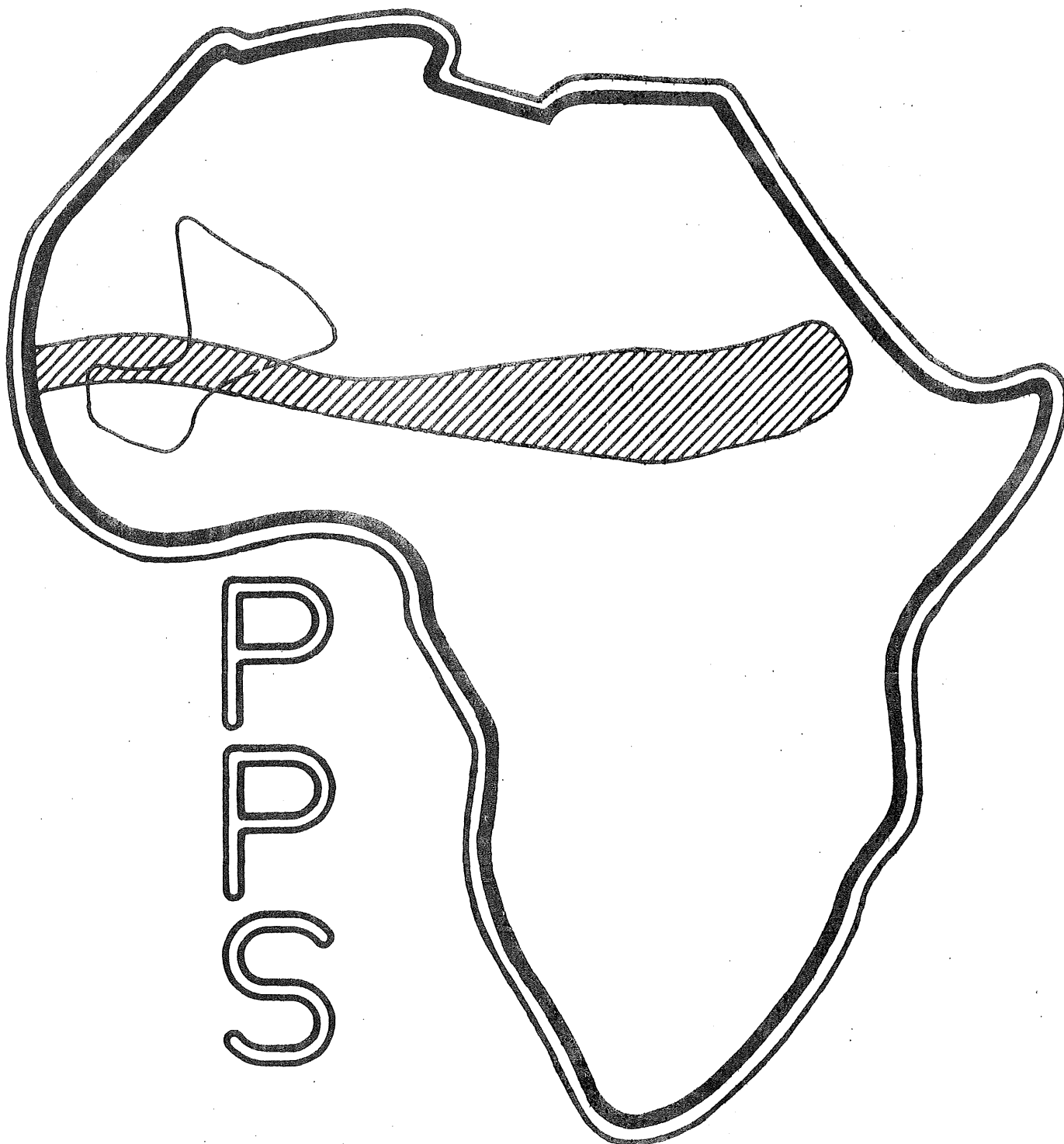


RESULTATS ET PERSPECTIVES DU PROJET

"PRODUCTION PRIMAIRE AU SAHEL", -ESQUISSE MI-CHEMIN-



écrit par : F.W.T. Penning de Vries, rédacteur
destiné à : l'usage interne et la commission d'évaluation
date : février 1978

RESULTATS ET PERSPECTIVES DU PROJET "PRODUCTION PRIMAIRE
AU SAHEL" (ESQUISSE MI-CHEMIN)

écrit par : F.W.T. Penning de Vries, rédacteur
destiné à : l'usage interne et la commission d'évaluation
date : février 1978

Introduction du projet

Le projet de recherche "Production Primaire au Sahel" (PPS), a commencé en 1976. Son but est d'approfondir les connaissances sur la production primaire dans les pâturages naturels du Sahel aux différents niveaux d'exploitation, découvrir de quelle manière on pourrait influencer ces processus afin de faire augmenter la production animale et afin de faire diminuer l'impact de catastrophes naturelles comme par exemple la sécheresse de 1971-1974. A la base de la recherche actuelle est l'étude faite dans le désert Negev (Van Keulen, 1975) laquelle a montré entre autres qu'il est assez bien possible de prédire la production végétale et l'usage d'eau des pâturages naturels à partir du régime des pluies, quand on a fait usage d'engrais chimiques.

Le projet actuel peut être considéré comme une suite, dont le centre d'intérêt comprend la production sans engrais chimiques ou avec très peu d'engrais chimiques et la valuer des pâturages pour la production secondaire.

On attache de l'importance à l'étude des processus plus qu'aux descriptions des situations naturelles ou des situations amenées expérimentalement.

Pour faire intégrer les résultats et les hypothèses dans un aperçu du total, on est en train de faire des modèles à simuler. L'applicabilité et le simplicité des modèles seront accentuées. Ce document sert de résumé préliminaire des résultats et sert de guide à leur intégration.

H. Breman et M.A. Djiteye (écologie), J.M. Krul et S. Sanogho (microbiologie), I. Cissé et F.W.T. Penning de Vries (physiologie), S. Diarra et L. Stroosnijder (pédologie) sont les responsables de la recherche. Beaucoup d'autres y contribuent avec leur travail ou avec leurs discussions. C.T. de Wit est le directeur scientifique.

Des résultats ont déjà été publiés et seront publiés encore par les membres du projet indépendamment, mais on s'efforcera aussi d'intégrer les résultats obtenus. Le travail expérimental du projet a été mais à execution pour la plupart dans un ranch près de Niono (Mali), à 300 km au nord-est de Bamako. Le ranch comprend 110 km² de dunes sablonneuses, plaines linoneuses et dépressions argileuses (Fig. 1), et il est protégé contre le gros bétail depuis 1960. Niono a un climat aride et tropical et reçoit 570 ± 20 mm de l'eau pluviale par an.

CARTE PÉDOLOGIQUE SEMI-DÉTAILLÉE D'UN RANCH SAHÉLIEN: NIONO, RÉPUBLIQUE DU MALI

Fig. 1.



Sols des dunes		Sols argileux des dépressions		Sols fluviatiles	
S1 sols des dunes	D1 sols argileux	L sols limoneux des plaines	F1 sols irrigués	— = piste	
S2 sols des dunes érodées	D2 sols argileux et vertiques	V vertisols	F2 sols non-irrigués	— drain permanent	
S3 sols des dépressions	W sols des drains	F3 sols non-irrigués avec une couche sableuse	----- drain sec		----- bourtou
			● village		● puits

L. Stroosnijder, S. Diarra et P. Buringh
Cartographie: P. G. M. Versteeg

Projet: Production Primaire au Sahel: S P 1704, Bamako, Rép. du Mali
De Dreyen 2, Wageningen, Pays - Bas 1977

Avec ce niveau de précipitation il est situé dans la frontière savane du Sahel.

On a déjà observé le sol et la végétation et on les observera encore à des endroits à l'extérieur du ranch, dans la zone du Mali qui reçoit 100 à 1000 mm de précipitation par an, sur des sols différents afin d'étudier la dynamique de la végétation. De cette manière on aura un cadre pour pouvoir extrapoler les résultats obtenus à Niono.

Quelques études au laboratoire pour soutenir le travail fait en plein champ sont réalisées à Bamako (Mali), mais la plupart des études sont réalisées à Wageningen (Pays Bas), où il y a des facilités extensives pour réaliser les simulations et pour scruter des questions spéciales.

UTILISATION DES PATURAGES AU SAHEL

On peut distinguer deux systèmes quant à l'utilisation des pâturages du Sahel; à savoir:

- 1) gros bétail, moutons, chèvres, paissant intensivement durant toute l'année;
- 2) les bêtes paissent intensivement seulement une fois par année pendant ou après la saison des pluies.

Beaucoup de pâturages au Sahel ne sont pas employés parce qu'il y a un manque d'eau au surface.

Brouter les feuilles et les fruits des arbres, dont la qualité dépasse souvent celle des herbes, peut contribuer considérablement à la nourriture du bétail. Il y a beaucoup de combinaisons des deux systèmes, adaptées à la situation locale.

Le premier système concerne le gros bétail sédentaire, moutons et chèvres, qu'on rentre chaque jour dans les villages après qu'on les ait fait paître. On fait usage des pâturages, un terrain d'un rayon d'environ 7 km, pendant toute l'année.

En général il y a abondamment de l'eau pour les animaux, de manière qu'une manque de nourriture se développe chaque année.

Il y a souvent surpâturage, ce qui diminue la productivité des pâturages.

L'usage de sous-produits de l'agriculture dans l'alimentation supplémentaire devient plus fréquent.

On est à la recherche de possibilités pour faire entrer dans ce système les cultures fourragères, en particulier de champs irrigués et de champs arides aux grandes potentialités agricoles.

Si notre projet n'a pas mis l'accent sur des questions pratiques concernant la production secondaire, il apporte toujours beaucoup d'information de base pour une telle recherche.

L'autre système concerne les troupes du gros bétail, moutons et chèvres, qui soit se déplacent continuellement à la recherche d'eau ou de nourriture (troupeau nomade), soit se déplacent par rotation entre pâturage de saison sèche et pâturages de saison des pluies (transhumance). Les deux types ont les mêmes effets sur les pâturages. Pendant la transhumance les troupeaux se dirigent vers le nord avec les pluies et l'herbe fraîche des pâturages du Sahel. Beaucoup de ceux-ci sont très humides et marécageux.

Les troupeaux retournent dans la savane quand il n'y a plus d'eau au surface. Normalement c'est le cas avant qu'il soit question de sur-pâturage, de sorte qu'il y a une protection naturelle contre la désertification. Quelques vaches restent aux villages où elles approvisionnent les familles résidentes en lait. Au centre du Mali, où est situé la zone d'étude de notre projet d'étude il y a transhumance entre les pâturages sahéliens du Mali et de Mauretanie, broutés une partie de juillet, août, septembre, octobre, et une partie de novembre, et les rives, à la végétation abondante, mais inondées pendant longtemps par le fleuve Niger avec son delta intérieur pendant la saison sèche.

La distance de 200 à 300 km est parcourue rapidement en faisant usage de routes fixes, mais à cause du nombre élevé d'animaux, les pâturages de ces routes sont si intensivement exploités qu'ils sont reconnaissables même sur des photographies prises à l'aide des satellites.

La période critique pour l'alimentation des bêtes se présente dans les deux systèmes à la fin de la période sèche quand la plupart de la biomasse consommable a disparu. Partout où il y avait un manque d'alimentation suffisante par hectare ou un manque de zones pâturables, de nombreux animaux sont morts durant cette période pendant les récentes années de sécheresse (Boudet, 1975). Des recherches sur la régression spontanée de la valeur des pâturages durant la saison sèche peuvent donc bien être insérées dans l'objectif du projet.

COMPOSITION BOTANIQUE DE LA VEGETATION

Le bétail sélectionne en pâturant: quelques espèces végétales sont préférées alors que d'autres sont évitées le plus longtemps possible.

Les jeunes plantes aux feuilles tendres sont préférées aux vieilles plantes ligneuses.

Normalement il y a une corrélation positive entre la qualité de la nourriture et la teneur en protéine, et une corrélation négative entre la qualité de la nourriture et la teneur en lignine. Mais nous ne sommes pas très bien informés sur la valeur nutritive et la saveur des plantes tropicales pour les animaux tropicaux, et non plus de l'applicabilité des conceptions et méthodes afin de pouvoir les déterminer dans des zones tempérées.

La valeur nutritive n'est pas une caractéristique d'une espèce végétale: en général la valeur diminue avec l'âge de la plante et la valeur augmente lorsque la fertilité du sol augmente. Cependant dans la pratique c'est la composition des espèces sur le pâturage qui donne une impression de sa valeur quant à la production secondaire puisqu'il existe une relation entre les espèces, la fertilité du sol et le niveau de production.

L'appetibilité est un élément plus constant dans les différentes espèces. Une interprétation prudente de la composition des espèces peut donc apporter de l'information. Ceci est démontré par Breman et Cissé (1977), qui ont comparé la composition botanique de régions non-pâturées et de régions pâturées du ranch après la sécheresse de 1971-1974 à la composition d'avant cette période.

Ils ont observé une regression relative dans les espèces non-appetées, ce qui soulignait la réduction de la productivité primaire par suite de la sécheresse, et ils ont calculé que la capacité de charge du ranch après la sécheresse était la moitié de la capacité avant la sécheresse.

Noy Meir a recherché les relations entre la productivité des pâturages, la teneur en azote de la plante et la consommation de nourriture sur la production de moutons à l'aide d'un modèle à simuler.

On s'efforcera d'appliquer ce modèle aux pâturages du Sahel dans un stade ultérieur du projet. Les grands changements dans la composition floristique ne se présentent pas uniquement à la suite de facteurs qui exercent leur influence pendant quelques années, comme par exemple une période de sécheresse ou une période de pâture, mais aussi à la suite de facteurs qui exercent leur influence d'une année à l'autre. L'abondance de *Blepharis linariifolia*, *Eragrostis tremula* et les légumineuses a subi une diminution perceptible de 1976 à 1977 dans le Sahel, tant que *Cenchrus biflorus* devenait plus important. On avait observé le même phénomène au ranch où au surplus *Schoenefeldia gracilis*, *Diheteropogon hagerupii*, *Elionurus elegans* et *Pennisetum pedicellatum* ont commencé à réoccuper le terrain qu'elles dominaient avant la sécheresse. Un des objectifs du projet est de découvrir comment ces changements importants se produisent, afin d'être à même de prédire de quelle manière les unités végétales réagiront à leur utilisation et aux conditions climatiques. On s'attend à ce que la germination des semences, le nombre de pousses, la compétition entre plantes et la production de graines jouent des rôles essentiels à cet égard.

Les observations en plein champ (*Brachiaria* spp., *Cenchrus*, *Diheteropogon*, *Digitaria gayana*, *Elionurus*, *Loudetia togoensis*, *Schoenefeldia*, *Sporobolus terrestris*, *Tripogon minimus*), ensemble avec quelques expérimentations au laboratoire (*Aristida mutabilis*, *Cenchrus*, *Eragrostis*, *Schoenefeldia*), suggèrent que, d'une façon générale,

les graminées germent en masse, une fois que la surface reste humide assez longtemps pour que les premiers processus germinatifs puissent s'accomplir et pour que la plantule puisse se développer. Cela prend 2 à 3 jours, suivant l'espèce, de sorte que la période de la germination sera 2 ou 3 jours après des précipitations de 10 à 20 mm. Une étude précise des plantes qui se développent après la récolte montre toujours que ce sont les pousses de plantes existantes qui se développent et non de nouvelles germinations et on a conclu que ce n'est qu'une fois par an que la germination des graminées se passe en une fois. La période de la dormance est très important pour ces graminées. On ne sait pas encore comment on pourrait interrompre ce processus si ce n'est que l'attente de 10 mois après la maturité. Les graines de dicotelydons (*Borreria chaetocephala*, *B. philifolia*, *B. radiata*, *B. stachydea*, *Blepharis*, *Cassia mimosoides*, *Zornia glochiata*) mettent plus de temps à germer. Une fois que les conditions nécessaires sont là, la germination commence, mais ces espèces continuent à germer pendant toute la saison. Selon l'estimation de Bille et Poupon ce n'est que 10% des graines produites qui germera réellement. La reste est consommé ou est gâté dans l'espace de quelques années. On a apporté quelque attention au nombre précis de graines produites par les différentes espèces, mais l'influence des conditions météorologiques et du pâturage, doit encore être recherchée.

La question de l'effet du feu sur la viabilité des graines est étudiée. L'importance de la production des graines est soulignée par une expérimentation au laboratoire qui montre que *Cenchrus* se révèle comme un grand compétiteur qui l'emporte aisément sur *Schoenefeldia* ou *Aristida* quand elles sont semées ensemble.

En tout état de cause, *Schoenefeldia* a une production de graines qui dépasse largement celle de *Cenchrus*; *Schoenefeldia* produit environ 10 fois de plus que *Cenchrus*, de sorte que *Schoenefeldia* a toutes les possibilités d'augmenter son abondance dans la génération suivante. On réalisera d'autres observations de ce même type sur les espèces annuelles et elles seront intégrées avec les observations sur le comportement des plantes à germer dans un modèle qui simule la dynamique de l'abondance d'espèces majeures en unités de végétations de différents types de pâturages dans différentes années et avec des traitements différents. En 1977 on a observé les dimensions des plantes et le nombre de plantes par unité de surface dans 4 unités de végétations au ranch. L'analyse de ces données apportera plus d'informations sur la compétition des plantes. Afin de confirmer de telles simulations, on suit pendant la durée du projet la composition de la végétation de 30 sites au ranch et la composition de la végétation de 30 sites le long du trajet nord-est sud-ouest à travers le Sahel. De plus, il y a des pâturages qui sont modifiés expérimentalement par élagage (simulation de pâture), par mise en défens et par fertilisation avec des phosphates. Les résultats de ces études seront beaucoup plus

détaillés que les simulations ne l'exigent et ils constitueront à eux-seuls une étude écologique sur le développement des pâturages. A l'extérieur du ranch on a suivi quelques troupeaux pendant un cycle complet de la transhumance. On a observé la composition des espèces constituent le menu des zébus (qui consomment beaucoup plus que les moutons et les chèvres qui passent) et la biomasse relative de ces espèces.

L'activité de quelques bêtes standard a été étudiée, mais il était difficile de contrôler leur consommation dans les champs. Les résultats de ces observations seront publiés (Diallo, 1978; Traoré, 1978). A l'exception des cas où il y a une abondance d'herbe fraîche, ce sont les feuilles des arbres qui représentent une partie considérable du menu. La teneur (en protéine) de ces feuilles (6-18%) dépasse toujours celle des graminées, et il semble plausible que ce n'est que grâce à cette source extra de protéine que les bêtes peuvent digérer la paille des graminées, très pauvres en protéine (3-6%).

Les graminées vivaces constituaient plus que 70% de la biomasse des zones non-pâturées du ranch avant la sécheresse. Là où la pâture intensive on ne les trouve pas parce qu'ils ne supportent pas une période intensive d'exploitation. La conséquence en est qu'elles ne constituent qu'une petite partie de la nourriture animale. Toujours est-il que c'est leur aptitude à former des pousses après un feu ou après les toutes premières pluies, c'est à dire avant la germination des annuelles, qui rend possible qu'elles peuvent servir temporairement de fourrage au moment où le manque de nourriture est au point critique, et à cet égard ces herbes ont une grande importance (Breman et Cissé, 1977).

PRODUCTION PRIMAIRE DES PATURAGES SAHELIENS

Les graminées et herbes annuelles, les graminées perennes, arbustes et petits arbres contribuent à la productivité des pâturages sahéliens. En gros, les annuelles contribuent la moitié de la production brute des pâturages non-exploités dans le sud du Sahel, et cette fraction s'élève à neuf dixièmes aux régions du nord. La quote-part des espèces perenne est diminuée par la pâture. C'est pour cela qu'on a mis l'accent sur les plantes annuelles.

Graminées annuelles

Breman et Diarra (1975) et Le Houerou et Hoste (1977) ont découvert une corrélation nette entre la récolte à la fin de la période de croissance et les précipitations moyennes des pâturages au sud du Sahara; entre 100 mm et 1000 mm. Chaque 100 mm de pluie correspond à 260 kg matière sèche ha^{-1} , quand on prend somme niveau initial les 360 kg ha^{-1} à 100 mm de pluie. De tels pâturages se

composent pour la plupart d'espèces annuelles. Le sol est très pauvre dans cette région et l'utilisation d'engrais montre en général une production double à quintuple des annuelles sans aucun autre traitement. La biomasse des pâturages non-exploités augmente considérablement aussi. Apparemment les précipitations ne sont pas le facteur limitant en ce qui concerne la production des pâturages. Néanmoins la corrélation nette entre les deux suggère une relation entre précipitation et production. Plus loin, on discutera la nature de cette relation après l'analyse des éléments minéraux.

Il est important d'étudier la production végétale sans déficit d'éléments minéraux parce que les résultats constituent une échelle pour mesurer la fertilité des sols et servent à déterminer l'effectivité des mesures destinées à l'amélioration de la fertilité du sol et les résultats peuvent être aussi le point de départ d'une discussion sur l'opportunité économique de l'utilisation des engrais.

A ce niveau de production, la croissance végétale est le plus souvent limitée par la quantité d'eau souterraine. On peut calculer avec quelle vitesse la végétation se développe dans de telles circonstances et avec quelle vitesse l'eau est transpirée. A cet effet, Van Keulen (1975) a développé un modèle à simuler la production des pâturages annuels dans la zone semi-aride d'une région à pluies hivernales en Israël. Ce modèle est basé sur une analyse détaillée des processus dans le système sol-plante. Depuis que les mêmes types de processus gouvernent la production dans autres parties du monde, cette étude et les études connexes (Van Keulen et De Wit, 1975) servent de base à l'étude actuelle. Conclusions importantes de cette étude:

1. Quand il y a une abondance d'éléments minéraux et de l'eau, les plantes se développent à une vitesse de 200 kg matière sèche jour⁻¹ en transpirent à une vitesse de 1 mm jour⁻¹ (jours frais en humide) à une vitesse de 6 mm jour⁻¹ (jours chauds et secs) en saison des pluies. On peut calculer correctement les deux vitesses à l'aide du modèle à simuler.
2. La photosynthèse et la transpiration sont liées étroitement. En cas de dessèchement du sol et de diminution de la transpiration, il est possible de prédire de quelle manière la photosynthèse et la croissance seront réduites.
3. Beaucoup d'espèces naturelles des pâturages poussent aussi bien que les espèces cultivées comme par exemple le blé dans de telles circonstances.

Dans son modèle Van Keulen se base en partie sur un modèle plus fondamental d'assimilation, de respiration et de transpiration par les surfaces des plantes (De Wit, 1978). On a beaucoup accentué l'évaluation du modèle qu'on vient de nommer mais on ne l'a pas encore validé dans des conditions tropicales. A cet effet on a commencé un projet dans un champ irrigué près de Niono afin de déterminer la vitesse de développement de quelques espèces bien connues (Rhodes grass, maïs, riz, canne

à sucre) dans des conditions optimales d'eau et éléments minéraux.

Fig. 2 donne la croissance des annuelles dans un pâturage naturel au ranch de Niono en 1977. Le sol sablonneux tout comme le sol argileux ont été fertilisés avec du P (phosphate triple super), de N (urée) et K et S (sous forme de K_2SO_4) en doses de respectivement: 100, 300, 80 et 40 kg ha⁻¹. Les champs étaient fortement dominés par une ou deux espèces: Schoenefeldia et Loudetia dominaient au sable et Diheteropogon à l'argile. Pendant la période de croissance c'est la végétation sur argile qui produit en effet environ de 200 kg matière sèche ha⁻¹ jour⁻¹ pour les parties aériennes et la croissance nette des racines s'est arrêtée. Cette grande vitesse de croissance ne diminue pas jusqu'à la maturité, et elle est accompagnée d'une élévation de l'indice foliaire (IF) qui monte de 2,0 à 4,5 m² m⁻² de sol. Des affections des fungi ou des insectes n'ont pas causé de grandes difficultés. Ce n'est qu'à la fin de la saison des pluies que les vieilles feuilles ont commencé à pourrir. Cette situation semble être bien en harmonie avec le modèle à simuler mais il faut encore une comparaison détaillée. Le feuillage de Schoenefeldia sur sol sablonneux (type S2, voir tableau 2) reste tout le temps clairsemé (IF < 3.0). Donc tout le rayonnement solaire n'est pas intercepté et la réduction d'assimilation qui en résulte fait réduire la croissance quotidienne attendue à 160 kg ha⁻¹. Néanmoins la vitesse réelle s'élève à 100-125 kg ha⁻¹ (et aussi 5-15 kg racines ha⁻¹ jour⁻¹). Le phénomène de flétrissement au plus chaud de la journée a été observé pendant quelques jours et selon toute probabilité ces espèces sont sujettes à un déficit d'eau malgré les conditions favorables de l'eau souterraine. Dans une autre expérimentation un champ semé de Schoenefeldia atteignait presque les 200 kg ha⁻¹ jour⁻¹ sur un substrat limoneux, et la vitesse de croissance égalait celle de Diheteropogon en pots. La faible vitesse de croissance sur sols sablonneux ne provient donc pas d'une potentialité inférieure de croissance de Schoenefeldia. Reste encore à rechercher pourquoi ces espèces, et peut être d'autres espèces encore, n'étaient pas capables de s'alimenter suffisamment en eau sur sol sablonneux.

Bien que le niveau de production dans des conditions optimales varie avec la quantité et la durée des pluies, il faut prendre conscience du fait que la récolte des champs non-irrigués, mais fertilisés suffisamment, peut être très élevée, en particulier sur sols argileux. Il est de l'avenir à rechercher les possibilités de tels champs afin de pouvoir les exploiter pour la production fourragère. En même temps on pourrait analyser son opportunité économique attachée aux systèmes actuels ou aux systèmes futurs. Il apparaît que la période nécessaire pour développer de telles annuelles est fortement déterminée intérieurement. Une combinaison des résultats d'une expérience qui partait de cinq dates de semis et les observations du Merlier (1972) indiquent que quelques graminées ont un cycle de croissance court et elles sont insensibles à la durée du jour alors que d'autres ont un long cycle végétatif

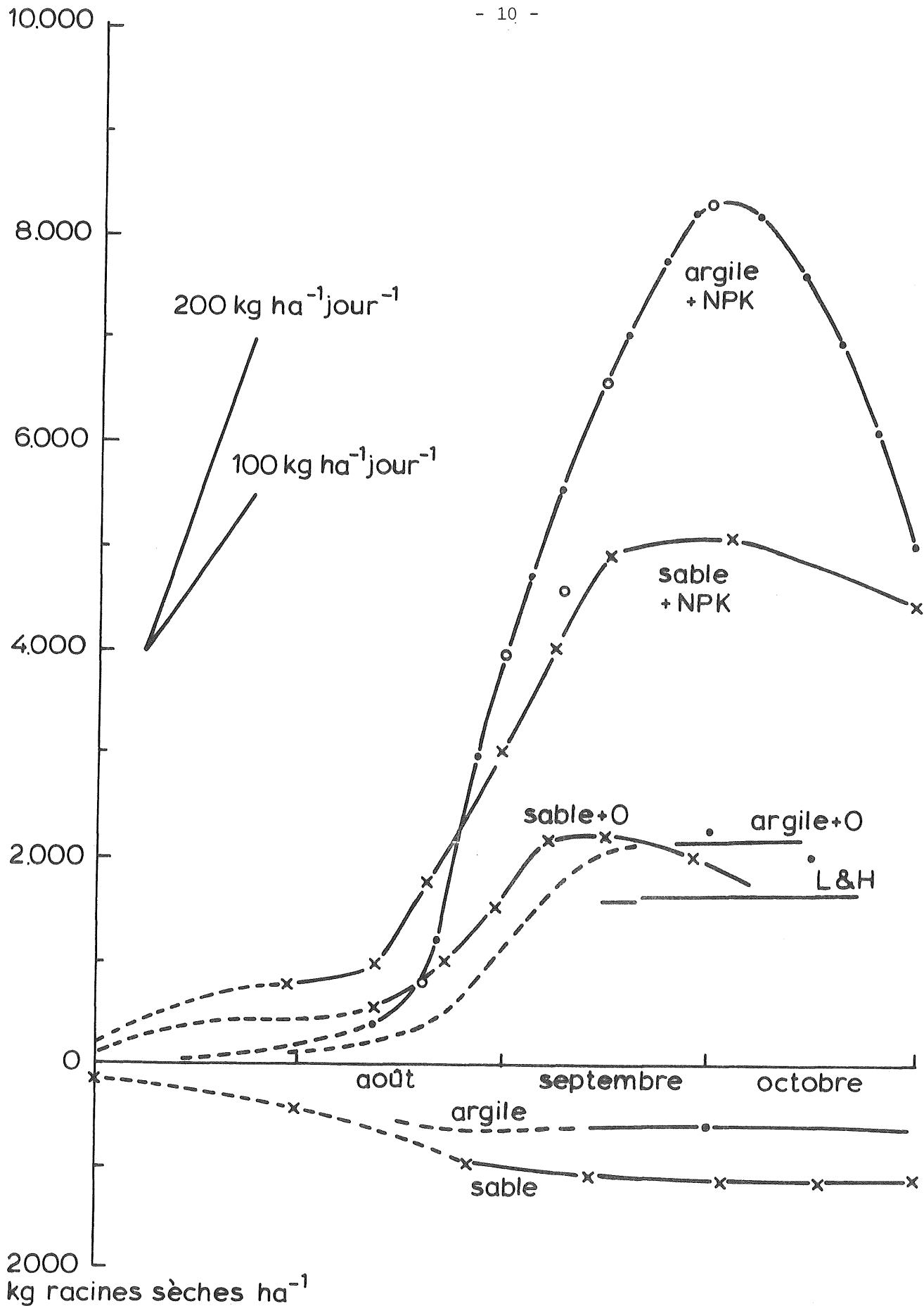


Fig. 2. La production aérienne et la production souterraine de matière sèche des graminées annuelles non-cultivées dans des pâturages bien fertilisés à Niono en 1977 sur sol sablonneux (croix) et sur sol argileux (points). Les valeurs indiquées sont les valeurs moyennes calculées de deux observations. Sont donnés comme références: les récoltes de petits terrains parallèles non-fertilisés et le niveau de production selon Le Houerou et Hoste (L+H).

et sont en général très sensibles. Les légumineuses ont besoin d'un jour court et elles mettent beaucoup de temps à venir en fleur alors que d'autres espèces herbacées ont une période fixée d'une longueur intermédiaire. Les résultats sont résumés dans le tableau 1 (l'effet de la longueur du jour semble être complètement opposé après le début de septembre). Après des pâtures ou des conditions plus favorables à la croissance, des pousses peuvent se développer. On étudiera l'indépendance de la régulation intérieure du développement de pousses individuelles. L'observation visuelle microscopique a montré que toutes les graminées naturelles importantes possédaient un étrange arrangement de cellules C_4 dans la graine végétale. Les dicotylédones (et on s'y attendait déjà) n'ont pas cet arrangement, donc ceux-ci doivent être des plantes C_3 . On a suivi la croissance des racines en 1977 dans le but de compléter les informations sur la production de biomasse et l'absorption des éléments minéraux. Les racines se développaient rapidement dans tous les cas (Fig. 2) et quelques racines suivaient nettement l'eau infiltrée, ce qui allait ensemble avec la vitesse de croissance qui était parfois de 4 cm jour^{-1} ou encore plus jusqu'à une profondeur de 100 ou 150 cm dans le sable. La croissance des racines s'arrêtait quand la vitesse était environ $1100 \text{ kg matière sèche ha}^{-1}$, longtemps avant que la biomasse aérienne n'arrêtait de s'accroître dans les endroits fertilisés. Il n'est toujours pas possible de faire une distinction nette entre la croissance nette et la croissance brute des racines. Quelques résultats suggèrent que les racines meurent après une ou deux semaines, mais qu'elles ne se décomposent pas avant la saison suivante. On n'a pas remarqué de différences significatives entre les profils, les moments de croissance, le nombre de racines poussées sur un petit terrain fortement fertilisé ou sur un terrain modérément fertilisé, ou un terrain non-fertilisé, sur dunes sablonneuses, mais la variabilité de 30% environ peut avoir dissimulé des différences plus petits que ça. Sur sols argileux fertilisés il semble que la biomasse des racines augmente lentement jusqu'à la maturité de la végétation, le profil est moins profond, et le nombre de racines est à peu près la moitié du quantité sur sols sablonneux. On examinera si différence est due à la présence des espèces aux champs ou au type de sol.

L'absorption des minéraux sur des sols bien fertilisés vaut 5 à 15 fois celle de la végétation des sols non-bonifiés.

Dans des conditions mauvaises, les plantes absorbent rapidement les minéraux disponibles et ces minéraux sont dilués dans la biomasse jusqu'à que la concentration soit minimale. Les éléments dont le ranch ne dispose pas suffisamment sont surtout P sur sols sablonneux et N sur sols argileux; il en sera question plus loin. Quelques expériences en plein champ ont été réalisées avec des niveaux intermédiaires de fertilisation en N et en P, et on a déterminé la croissance et l'absorption des minéraux. L'analyse des résultats apportera de plus amples informations destinées à un modèle qu'on est en train de développer. Ce modèle sera prêt

Tableau 1. La durée de la période végétative en fonction de la date de germination. Dans la cas où la germination a lieu de 1^{er} juin, on trouve à la colonne 1 la période qui était nécessaire pour venir en fleur. Si la germination a lieu plus tôt ou plus tard, cette période doit être diminuée ou polongée avec ce délai multiplié par le facteur de sensibilité qui se trouve à la colonne 2. Ce calcul s'applique à la germination qui a lieu entre le 1^{er} juin et le 1^{er} septembre. La période végétative compte 30 jours au moins. Sources: M = Merlier (1972), P = PPS.

Espèces	période jusqu'à floraison, si germination a lieu par juillet 1	facteur de sensibilité	développement végétative continue après floraison	source
Alysicarpus ovalifolius	70	0.5		M
Cassia mimosoides	95	0.7		M
Cassia tora	55	0.5	+	P
Indigofera astragalina	75	0.9	+	M
" "	55	0.5	+	P
Zornia glochidiata	65	0.4	-	M
" "	55	0.4	-	P
(légumineuses en moyenne)	(67+15)	(0.6+0.2)		
Brachiaria spp (5 espèces)	35	0.0		M
Cenchrus biflorus	50	0.2	+	M
" "	50	0.4	-	P
Dactyloctenium aegyptium	35	0.0		M
Loudetia togoensis	50	0.5	-	P
Panicum laetum	30	0.0		M
(graminées rapides en moyenne)	(40+10)	(0.1+0.2)		
Andropogon pseudapricus	95	0.7		M
Diheteropogon hagerupii	70	0.2	-	P
Eragrostis tremula	75	1.0		M
Pennisetum pedicellatum	95	0.7		M
Schoenefeldia gracilis	75	0.2	-	M
" "	60	0.6	-	P
(graminées lentes en moyenne)	(80+15)	(0.6+0.3)		
Blefarus limearifolia	60	0.0	+	P
Borreria radiana	60	0.2	-	P

à la fin du projet et aura la possibilité de simuler: la production végétale, l'absorption et transpiration des minéraux, des espèces végétales dominantes, la fertilité du sol et le climat. La croissance de la végétation sur terrains non-fertilisés est donnée aussi dans la Fig. 2. Les valeurs finales obtenues au ranch en 1977 ne différaient pas beaucoup de celles obtenues en 1976. Pourtant, à la coupe transversale sahélienne, la production des annuelles au nord de Niono en 1977 était en moyenne la moitié de la production en 1976 ce qui suit probablement des pluies moins fréquentes.

Quelques pâturages produisaient moins que la moitié tant que d'autres produisaient plus que la moitié. Le modèle à simuler qu'on est en train de développer est censé être capable de calculer d'avance ces résultats.

Graminées perennes et arbres

On a étudié les graminées perennes et les arbres afin de pouvoir estimer leur production annuelle, leur consommation d'eau et d'éléments minéraux. Les touffes d'*Andropogon gayanus* produisaient 4000-5000 kg matière sèche $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en 1975 au ranch au moment où l'espèce avait commencé à reprendre après la sécheresse, qui avait eu pour résultat une réduction réelle des espèces. Cissé (1976) a étudié son comportement avec fertilisation et son comportement à la coupe. Avec une quantité suffisante d'éléments minéraux la production était de 8000 kg $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ de sorte qu'il semble que leur production potentielle est au même niveau que celle d'annuelles fertilisées (Vu la période de croissance d'*Andropogon* qui est beaucoup plus longue que celle de *Diheteropogon*, on pourrait s'attendre à des valeurs plus élevées de 50 à 100%). On a coupé les parties aériennes à 5 cm une fois dans la saison de croissance et la conséquence en était une diminution de la production de plus de 50% sur sols non-fertilisés. Quand les parties aériennes étaient coupées au milieu de la saison, et une diminution moins importante quand elles étaient coupées plus tôt ou plus tard dans la saison. La production annuelle a été réduite à 1000 kg ha^{-1} ou encore moins dans la première année quand les coupes étaient régulièrement et cet effet se maintenait pendant quelques années. Il semble que cet effet de la coupe soit causé par enlever les points de croissance et par l'enlèvement de trop de nutriments végétales. On fait une analyse détaillée de la croissance de l'espèce afin de déterminer dans quelle mesure *Andropogon* est capable de supporter la pâture. On recherchera comment il est possible que ces plantes aient une production qui est presque le double de celle d'annuelles dans les pâturages naturels et qu'en même temps ces plantes ne supportent pas la pâture intensive.

On a déterminé la biomasse de certaines espèces d'arbres courants au ranch. La biomasse d'environ 30 exemplaires a été déterminée pour les espèces *Acacia seyal*, *Combretum ghasalense*, *Pterocarpus lucens* et *Sklerocaria birrea*, au cours de la

saison et aussi la biomasse d'environ dix pieds de l'arbuste *Boscia senegalensis*. On a établi des corrélations entre le diamètre du tronc et le poids du tronc, des branches et des feuilles. Le poids du tronc ensemble avec le poids des grandes branches est environ 9000 kg ha^{-1} sur sols sablonneux avec une végétation assez claire (il y a environ 100 arbres de dimensions moyennes ha^{-1} comme par exemple *A. seyal*), le poids des branches plus petites était 2200 kg ha^{-1} .

Il y a environ 650 kg ha^{-1} de feuilles en saison des pluies. Dans les dépressions avec une végétation plus dense et sur sols argileux il y a environ 300 arbres ha^{-1} , dont la moitié est *Pterocarpus* ou arbres de dimensions comparables. Les poids correspondants sont estimés à respectivement 41.000, 5400, 1500 et 8000 kg ha^{-1} (Ces chiffres ne sont pas représentatifs quant aux pâturages à l'entour du ranch car c'est là que le reboisement s'est considérablement effectué grâce à la protection dont jouit le ranch). Partant d'une vie moyenne de 25 ans du bois, de 5 ans pour les branches et les racines et un an pour les feuilles, on peut estimer la production nette annuelle à $1200\text{-}3000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, tant qu'une quantité comparable de troncs morts, branches et feuilles mortes sont substitués. De plus il y a $1000\text{-}1500 \text{ kg}$ de feuilles $\text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ produites et tombées par terre.

Un premier calcul fait illustrer les conséquences de tels chiffres en ce qui concerne la consommation d'eau, bien que ces résultats soient en effet très décevants. La synthèse de matière sèche des arbres exige environ $1,4 \text{ g}$ glucose g^{-1} matière sèche. L'entretien biochimique de composants d'arbre est estimé être environ $1500\text{-}5000 \text{ kg}$ glucose $\text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Et quand on part en outre de la supposition que chez ces espèces C_3 le rapport entre la photosynthèse et la transpiration est de 280 kg d'eau kg^{-1} glucose, on aboutit à une consommation d'eau de 175 à 400 mm an^{-1} . Ceci est un chiffre bien appréciable et ce chiffre donne la justification de rechercher de plus près ce problème.

Un calcul en gros comparable indique qu'il y a environ 20 à 70 kg N et un dixième de cette quantité en P aux arbustes et aux arbres, et ce sont des quantités importantes à la balance de N des pâturages. Une première impression nous dit que les arbres consomment beaucoup d'eau et qu'ils stockent beaucoup de minéraux alors que leur production primaire est assez faible.

ELEMENTS MINERAUX ET PRODUCTIVITE

Une très grande partie des sols sahéliens est chimiquement pauvre et les sols du ranch ne font pas exception. Dans le tableau 2 sont donnés quelques exemples des caractéristiques des sols. Tous les sols sont légèrement acides et ont une capacité très limitée d'échange de cations (CEC).

Il y a très peu de N et de P et le rapport C/N de la matière organique n'est pas favorable. Néanmoins il n'est pas possible d'estimer dans quelle mesure les

plantes ont la disposition d'éléments du sol en mesurant seulement la concentration au sol et on aura besoin d'analyser les plantes. Il y a beaucoup d'études sur le point de paraître ayant pour objet la croissance végétale et l'absorption des minéraux et ces études examineront des processus qui se produisent dans le système sol-plante. L'accent sera mis sur les sols où poussent des plantes annuelles. Comme on l'a dit plus haut, les végétations pourvues en P, N, K et S croissent comme on l'avait prévu, quand elles ne sont gênées dans leur croissance que par les conditions climatologiques. Pour cela on a conclu que malgré un manque d'éléments majeurs (macroéléments), il n'y a pas un déficit d'éléments mineurs (microéléments) pour la production végétale, bien que cela puisse se développer dans le cas de récoltes répétées.

L'application de molybdène et d'autres éléments mineurs aux légumineuses n'a pas eu un effet notable sur leur croissance ou sur leur développement. Un déficit de zinc peut s'être manifesté chez *Diheteropogon* sur sols dégradés. La production est stimulée faiblement par l'application de K_2SO_4 (quantités de 150 kg K et 60 kg S ha^{-1}) sur dunes sablonneuses, plaines limoneuses, et dépressions argileuses. Cependant ce stimulus est de la même valeur que la déviation standard de la biomasse des champs environnants (15%). L'effet-fût-il réel, est probablement provoqué par K, bien qu'on ne puisse pas encore exclure l'effet de S. Avec des apports élevés en N et en P, les plantes montrent un déficit en K et en S et l'apport de ces éléments est nécessaire. Les analyses chimiques des plantes récoltées en 1977 apporteront de plus amples informations. Mais il est clair qu'une investigation centrée sur les processus concernant la disponibilité de N et de P est justifiée afin de concevoir la croissance végétale au Sahel.

La balance d'azote

Les processus dont il s'agit sont ceux qui se passent dans le sol (décomposition, minéralisation, immobilisation), l'absorption des plantes et le transfert dans le sol, et processus qui font changer la quantité d'azote dans le système sol-plante (précipitations, drainage, dénitrification, volatilisation, fixation, feu et exploitation). On ne sait que peu de chiffres caractéristiques de ces processus. Afin de pouvoir les déterminer le plus vite possible, un cadre conceptuel de la balance d'azote a été proposé récemment par De Wit, Van Keulen et Ketelaars, un cadre destiné aux recherches subséquentes du Mali, Israël, Australie et aux Pays Bas. Voici l'idée:

En première approximation l'input annuel en N par sources naturelles (Ni), par pluies, légumineuses et algues, est constant dans une localité donnée. Le N accumulé dans la biomasse aérienne est recyclé dans le système sol-plante. Ces deux termes déterminent la quantité en N total dans la récolte. Si N_c représente cette

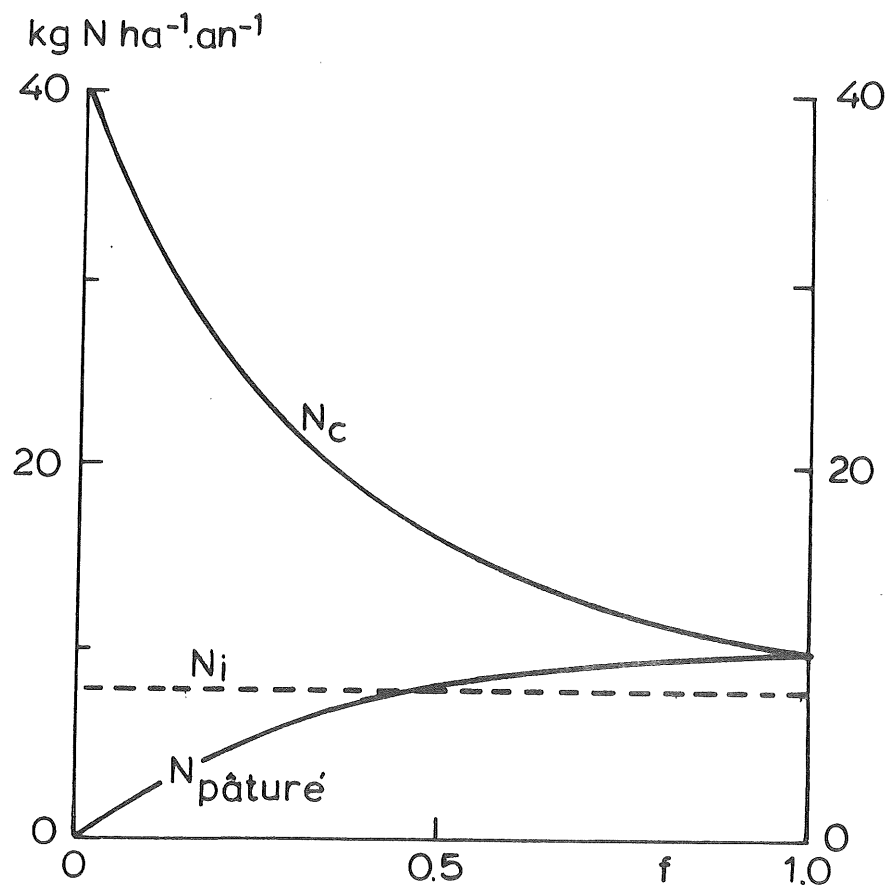


Fig. 3: La relation entre la quantité d'azote incorporée dans la production de biomasse d'une année et la quantité d'azote pâturée en fonction de la fraction (f) de la biomasse produite en une année. N_i représente l'input annuel d'azote qui vient de sources naturelles.

quantité et r représente le rendement total moyen de recyclage de N (c'est à dire la fraction de N_c disponible à une récolte suivante) on a la relation suivante:
 $N_i = (1-r) \times N_c$.

Il y a deux situations extrêmes d'équilibre à distinguer:

- dans la première il n'y a pas de pâture et la végétation se développe et détériore d'année en année.

Dans ce cas on a probablement affaire à un r élevé, par exemple 0,8 (r_{ng}).

- dans l'autre extrême, presque toute la végétation est pâturée. Alors on aura affaire à une valeur basse en r , par exemple 0,2.

En ce qui concerne les situations intermédiaires (r_g) où le f représente la fraction pâturée de la récolte sur pied, on estime le r à:

$$r = f \times r_g + (1-f) \times r_{ng}$$

Les conséquences qualitatives de ce raisonnement concernant la situation équilibrée sont mises en graphique dans Fig. 3, en admettant que $N_i = 8 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Quand on tient en outre compte de la pâture sélective des animaux quant aux parties riches en protéines, les deux courbes de Fig. 3 s'approchent encore plus vite. Il est évident qu'une situation d'une pression légère, pâturage est favorable parce que:

1. c'est déjà à ce niveau d'exploitation qu'on a récolté plus que la moitié de l'input annuel en N;
2. la végétation n'est pas surpâturée;
3. la qualité du fourrage est bonne;
4. il y a une réserve en N qui peut servir les années où les pluies sont moins fréquentes.

Néanmoins le danger d'incendie deviendra plus grand, et les dommages causés par des termites peuvent être plus grands. Afin d'arriver à une telle situation il faut développer un système de direction d'eau vers lequel le troupeau sera forcé à se déplacer au moment où 10-20% de la biomasse a été pâturée. Des informations sur le rapport N pâturé/N présent dans la végétation en relation avec le degré de pâture et avec les compositions différentes de végétation peuvent être obtenues avec les mesures réalisées en Israël. Peut-être qu'il vaut la peine de considérer à cet effet les différences éventuelles entre les moutons (Israël) et le gros bétail (Mali), en particulier les cas où la disponibilité de pâturages est limitée. Il ne s'agit que de 5% du N récolté par les animaux qui est incorporé, le reste étant dans les excréments. La plupart de N présent dans les excréments se volatilise et approximativement on admet que 80% de N pâturé ne retourne pas dans le système sol-plante. La fraction f étant constante, la situation d'équilibre est stable, puisque N_i a une valeur constante et la perte en N du système est une fraction constante du total.

matière sèche
kg ha⁻¹an⁻¹

12.000

N

10.000

8.000

6.000

4.000

2.000

0

0

200

600

1000

mm précipitation an⁻¹

pâturages
améliorés

pâturé

surpâturé

- pâturages fertilisés
- · - pâturages naturels non-pâturés
- - - pâturages pâturés intensivement
- + - Ni

Fig. 4

Relations schématiques entre la production de matière sèche et les précipitations dans des pâturages annuels exploités différemment. La quantité en N absorbée par la récolte annuellement et l'input annuel en azote (Ni, dans précipitations et N-fixation) sont donnés aussi.

La situation originelle se redéveloppera dans quelques années après une perturbation. Quand les pâturages, comme les champs agricoles, sont employés en pâture régulière il est nécessaire de maintenir l'équilibre entre l'input et l'output de l'élément qui limite la croissance. Cet élément est souvent N. Quand l'output dépasse l'input, les niveaux de productivité baissent plus ou moins lent; la vitesse dépend des possibilités du sol à constituer un tampon.

Fig. 3 en combinaison avec la relation entre précipitations et productivité et avec les observations sur la croissance potentielle donne la Fig. 4. La plupart des quantités en N sont estimées dans ce graphique, les résultats des analyses chimiques n'étant pas encore disponibles.

Les quelques résultats disponibles maintenant suggèrent que le r dans les pâturages sahéliens est environ 0,6 ou encore moins sur sols argileux. La quantité en N recyclée d'une récolte à la récolte de l'année suivante se compose de fractions qui se décomposent au cours de quelques années. Les contributions relatives de ces fractions peuvent varier avec le temps qu'il fait, de sorte que r est la moyenne à long terme et n'est donc pas applicable aux années individuelles. d1, d2 etc. dénotant les fractions en N en matière organique qui se décomposent la première année, la seconde année etc., on peut exprimer l'effet du transfert par un calcul du Nc en année n:

$$Nc.n = Ni + f \times r_g \times Nc. n-1 + (1-f) \times r_{ng} \times (d1 \times Nc.n-1 + d2 \times Nc. n-2 + \text{etc.})$$

La somme de d1, d2 etc. est égale à 1. On a besoin de recherches sur leurs valeurs le plus vite possible. En Israël on réalisera dans les années à venir un projet ayant pour but d'ajouter au sol de la matière organique enrichie fortement de N¹⁵, afin d'étudier la décomposition et la minéralisation. Dans la situation d'équilibre il y a identité de la quantité en N minéralisée de la matière organique du sol et de la quantité immobilisée.

Toujours est-il que le milieu peut causer de grandes fluctuations dans la minéralisation d'une année à l'autre, alors que l'immobilisation est probablement un processus plus constant. C'est pour cela qu'il faut considérer les deux processus à part. Le désert Negev contient environ 3000 kg N ha⁻¹ en matière organique du sol, tout comme en zones tempérées, et la recirculation de cette matière constitue un terme important de la balance d'azote. Au ranch, les sols les plus pauvres (comme S1) contiennent environ 1000 kg N ha⁻¹ dans la zone où se trouvent les racines, alors que les zones les meilleures (comme D1 et S3) en contiennent deux fois de plus. (La richesse en N de pâturages naturels va de 10 kg N ha⁻¹ sur sols argileux (D1) à 30 kg N ha⁻¹ sur sols sablonneux (S1), tandis que la biomasse dans les dépressions des dunes sablonneuses (S3) est encore plus grande. La quantité en N dans la couche

de litière peut aussi être grande). Bienque ces valeurs soient beaucoup plus basses qu'elles ne le sont ailleurs, c'est toujours le sol qui peut contribuer considérablement à la disponibilité de N. Ceci est estimé ainsi: les valeurs CEC de matière organique, calculées selon la méthode Bennema (197.) ne font que le 1/3 des valeurs normales de 2-3 meq g⁻¹. Pour l'expliquer on peut concevoir qu'environ la moitié du C au sol est inerte (peut-être sous forme de charbon de bois) tant que le reste du C ensemble avec le total en azote forme de l'humus d'une composition normale (Alors un simple rapport C/N est sans valeur). Le degré de minéralisation de cette fraction d'humus peut être le triple du degré observé en zones tempérées (1-5% an⁻¹, Van Veen, 1977), par suite des températures élevées, mais ce n'est que pendant les 3-4 mois pendant lesquels le sol est humide, qu'il est possible d'atteindre ce degré de minéralisation. Par extrapolation on aboutit à une estimation de la minéralisation de 0,7-2% an⁻¹ de N du sol (ou 7-15 kg N ha⁻¹ à S1 et 20-40 kg ha⁻¹ à D1), quand on considère les degrés de minéralisation les plus hauts, cités par Van Veen comme non-applicables. La végétation d'un sol argileux a absorbé beaucoup moins N que le permet le haut degré de minéralisation. Comme la fertilisation en P (phosphate triple super ou phosphate naturel) a stimulé la production de la biomasse des graminées annuelles à D1 de 50 à 100% (5-10 kg N ha⁻¹), il semble que la fertilisation en P a éliminé la restriction d'un déficit en P des microorganismes minéralisants. La même réaction sur P et donc la même conclusion vaut pour les sols très sablonneux (S2).

L'absorption réelle de N à S1 n'a pas montré une réaction avec fertilisation en P, il semble que la limitation par un déficit de P soit absente de ce type de sol au niveau bas de la production. D'urgence, il faut confirmer expérimentalement ces suggestions. Le N provenant de la minéralisation ou provenant d'une autre source, peut être absorbé par des microbes et de la même importance que celle des plantes et parce que ce sont les microbes qui s'en approvisionnent les premiers, il est important de suivre la croissance des microbes afin de connaître le moment où le N sera disponible pour les plantes.

On a déjà indiqué les effets de l'exploitation.

Peu: Quelque 30-60% de l'N organique est volatilisé à la suite des feux de brousse (Rundell, 1976).

Les pâturages ne sont pas brûlés complètement. Moins il y a de biomasse, plus la conservation est grande. Les chiffres donnés par Rundell semblent raisonnables pour des pâturages d'une biomasse de 1000 à 3000 kg matière sèche ha⁻¹. Les conséquences des feux de brousse, qui constituent un danger permanent dans les régions arides et semi-arides peuvent être calculées facilement du système simplifié que représente Fig. 3. Dans le cas le plus extrême la récolte est brûlée avant que la pâture a commencé. Dans ce cas là c'est tout le stock en N à la récolte qui est

perdu. L'année suivante le Nc sera alors égal au Ni. La période dont les récoltes ont besoin pour reprendre dépend de la valeur de r, du reste dans des conditions constantes: plus le r est grand, plus la reprise est lente. Un incendie au début de la saison humide n'est peut-être pas tellement désastreux en parlant de pertes en N et un tel incendie fait souvent monter le f en améliorant la disponibilité de matière fraîche. La plupart des sols ont une couche sèche en permanence à une certaine profondeur de telle sorte que le drainage d'éléments minéraux ne se présente pas. Pourtant, dans quelques endroits où l'eau s'accumule, des éléments minéraux peuvent être drainés avec l'eau. La quantité d'éléments minéraux qui est ainsi perdue sera estimée dans une étude d'un bassin hydrolique. Dans les régions où il y a écoulement d'eau, le transport des éléments minéraux sur la surface sera important à la longue et il sera utile de spécifier le processus afin de comprendre les déplacements de N de système. Les éléments minéraux ne se déplacent pas en direction horizontale dans le sol.

Putréfaction: La putréfaction peut causer des pertes en N. Vu que la plupart des plantes se dessèchent complètement avant qu'elles tombent, on prend la putréfaction pour un facteur négligeable au début de la mort des plantes, excepté le cas où la productivité a été grande et où les plantes sont presque couchées. Une autre exception est faite pour les feuilles de Zornia. Zornia commence à laisser tomber les feuilles déjà dans la phase de la formation de la graine et bien qu'une certaine quantité d'azote présente dans les feuilles soit transportée dans les graines, il reste toujours 10-30 kg N ha⁻¹ et cette quantité tombe par terre avec les feuilles. Le pH de telles feuilles est environ 8, ce qui active la volatilisisation. Il n'y a pas d'indications d'accumulation de N aux champs de Zornia ce qui est une autre confirmation de l'idée d'une perte de N d'une même ampleur de sa fixation annuelle. Des expériences seront réalisées afin de définir dans quelle mesure la putréfaction peut poser des problèmes. Une possibilité de mesurer la volatilisisation de N à des endroits sélectionnés au champ est probablement fournie par des structures avec lesquelles on couvrira complètement les plantes et le sol afin de collectionner et de déterminer la quantité en NH₃.

Les termites sont souvent actifs dans les sols contenant plus de 20-25% de limon. La matière organique apportée dans leur termitière est de 100 kg matière sèche an⁻¹ et est consommée tout à fait. Les minéraux restent et s'accumulent, mais C se perd (Miedema et Van Vuure, 1977) et probablement le N se perd aussi. Termites et fourmis cherchent leur nourriture en particulier dans la couche de litière et les plantes sur pied se sont presque jamais attaquées. Dans le site expérimental sur sol argileux (D1) la plupart de la biomasse par terre piétinée a disparu juste avant la saison de pluies, surtout par les activités des termites et des fourmis, et c'est cela qui peut avoir eu une influence notable sur la valeur basse de r trouvée dans ce cas

(Fig. 4). L'extrapolation de l'information de Miedema et de Van Vuure suggère que de cette manière une très grande partie de la quantité en N qui se trouvait sur sol ($5-10 \text{ kg N ha}^{-1}$) se perd ainsi (r bas).

Les observations dans une expérience avec excréments d'animaux, lesquels sont mangés par les termites dans un mois de la déposition ont démontré que les plantes qui poussent à côté des excréments n'ont pas une croissance plus active que les plantes qui poussent à quelque distances des excréments: donc cette conclusion est en concordance avec les suppositions mentionnées plus haut. L'activité des termites sur type de sol S2 n'est pas importante. Malheureusement on n'a pas répété sur type de sol S2 les expériences avec les excréments afin de pouvoir démontrer que les pertes en N sont de moindre importance dans ce cas. Dans les régions où les pluies sont moins abondantes on a observé des bousiers qui enterrent énergiquement les excréments des animaux et l'efficacité de la circulation de N peut être beaucoup plus grande. Il faut encore plus d'investigations car les implications relatives la balance de N sont grandes.

Dénitrification: est considérée comme négligeable, parce qu'il y a peu de substances organiques disponibles pour les microbes, et parce que la concentration en NO_3 est en général trop basse. Ce n'est qu'après fertilisation que la dénitrification peut devenir plus importante, mais jusqu'alors on n'a pas conclu que cela arrive réellement. Néanmoins, la mesure directe de la dénitrification par la détermination de N_2O en présence d'acétylène pourrait être considérée. Afin de déterminer exactement les quantités perdues en N sur les différents types de sol au ranch, on a appliqué de l'urée en quantités de 0, 75, 150 et 300 kg N ha^{-1} avec suffisamment de P et champs sans légumineuse. Le N présent dans NH_4 ou NO_3 au sol et la quantité totale en N dans les récoltes végétales sera contrôlée pendant trois années successives. Dans une prairie en Amérique du Nord, la récupération en N dans la période de quelques années après une grande fertilisation était de 80%. Le reste est probablement immobilisé dans le sol (Power, 196.).

La quantité en N apportée par la pluie annuellement n'a pas encore été déterminée, parce que la mesure entraîne beaucoup de difficultés. Le chiffre de $1,0 \text{ kg N ha}^{-1} 100 \text{ mm}^{-1}$ a été trouvé en Côte d'Ivoire par Villecourt (1975). Une étude sur la distribution géographique de la précipitation sèche et humide en NH_3 et NO_x en Europe occidentale a démontré que $2-11 \text{ kg N ha}^{-1}$ est déposé annuellement. Les valeurs réelles ne sont pas en relation avec les précipitations, mais avec le degré d'industrialisation (Söderlund, 1977). La validité d'extrapolation des résultats de la Côte d'Ivoire au Sahel est douteuse et les chiffres trouvés peuvent très bien être plus élevés qu'ils ne sont en réalité au Sahel. Dans un article récent (Jenkinson, 1977) on suggère que précipitation sèche en NH_3 de l'atmosphère peut

contribuer à l'input de N. La littérature en question doit être étudiée en détail. Certaines bactéries associées aux racines fixent du N aérien et aussi quelques bactéries non-associées ont cette capacité. Leurs contributions maximales ont été estimées à l'occasion du symposium récent sur "La potentialité et la limitation de la fixation de N aux tropiques", à $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les bactéries associées aux racines des graminées et à $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour des bactéries non-associées, y compris les bactéries de la surface du sol. Les Rhizobia des légumineuses peuvent fixer jusqu'à $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Notre projet cherche à établir de telles valeurs pour les pâturages naturels sahéliens. La fixation de N des bactéries associées et celles qui sont associées aux racines a été mesurée par la méthode de la réduction d'acétylène, la fixation de N par les Rhizobia de légumineuses à l'aide de récoltes et d'analyses Kjeldahl.

La fixation de N par les légumineuses peut être important: un champ naturel de Zornia pur produit environ 30 kg N ha^{-1} au ranch et 60 kg N ha^{-1} sur sols enrichis en P (40 kg P ha^{-1}). Par soustraction de N des graminées de telles régions de N dans le Zornia on a trouvé que Zornia a fixé $15\text{--}45 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. (Un point important est la relation entre le N provenant de la fixation et le N absorbé du sol. Vallis, en Australie, faisant usage de N^{15} , a trouvé que 80% à 90% du total en N des légumineuses résultait de fixation. La méthode employée semble assez simple et pourrait être appliquée en Israël et du Mali aux légumineuses à graines et qui ont poussé spontanément). Indigofera astragalina et Alysicarpus ovalifolius sont d'autres fixateurs actifs de N, mais ils ne sont jamais d'une telle abondance que Zornia. Stylosanthes humilis semé fixe le N assez bien en expérimentation: ($25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ non-fertilisés, jusqu'à $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ fertilisés avec P). Son degré de fixation de N n'est pas supérieur aux légumineuses autochtones, mais il y a une période de croissance plus longue, de sorte que la biomasse augmente avec la durée de la saison. On n'a pas observé des problèmes d'inoculation d'aucune plante autochtone au ranch de Niono ou à l'extérieur du ranch. Cassia tora, une autre légumineuse qui se trouve abondamment, ne fixe pas le N au champ ni au laboratoire. Les légumineuses annuelles représentent 5-30% de la biomasse végétale et ainsi on peut estimer leur contribution à $2\text{--}7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. L'introduction d'espèces de légumineuses supérieures ne peut pas encore être réalisée par manque d'espèces convenables mais les recherches d'espèces sont continuées.

Arbres légumineuses se trouvent abondamment en zone sahélienne, mais on n'a pas encore déterminé leur degré de fixation de N. Les mesures de fixation de N par les bactéries associées aux graminées ont montré que Aristida, Cenchrus, Diheteropogon, Loudetia et Schoenefeldia fixent des quantités négligeables aux champs.

Une touffe de graminée vivace (*Andropogon gayanus*), prise près de Bamako a montré un degré d'environ 2.10^{-4} g plante⁻¹ an⁻¹, ce qui est négligeable aussi aux champs purs. On n'a pas trouvé des indications en plein champ, qu'il y aurait quelques espèces plus actives que les espèces examinées; donc il semble inutile de prolonger les recherches qui portent sur cet aspect des pâturages sahéliens.

La vitesse de fixation des bactéries qui vivent sur la surface du sol dans des conditions favorables est déterminée à 1 g ha⁻¹ an⁻¹ pendant la nuit et cette vitesse est 2-4 fois plus grande pendant la journée. Les algues en particulier sont très importantes à cet effet. Estimant que la surface est humide pendant le nombre d'heures identique au nombre de mm de pluie et que la plupart des précipitations tombent pendant le jour, leur contribution est estimée à 2 kg ha⁻¹ an⁻¹ sur sols sablonneux de Niono au ranch. La vitesse de ce processus n'a pas l'air d'être limitée par un déficit en P, puisque sur champs fertilisés en P, la population d'algues ne s'est pas accru. La recherche de ce sujet doit continuer. On ne s'attend pas à ce que l'effet ombrageant des plantes cause une réduction de ce chiffre, parce que même si le feuilletage s'est développé complètement, il y a toujours suffisamment de lumière qui pénètre jusqu'à la surface du sol. C'est ce qui fait que la fixation de N par algues n'est pas négligeable si du moins leur nombre est suffisant. L'extension de leur présence doit encore être établie.

Les pâturages sahéliens exploités par le gros bétail en transhumance sont très humides, ce qui est un résultat de la couche imperméable à petite profondeur. Les investigations sont nécessaires afin de contrôler si les vitesses mentionnées plus haut sont différentes de celles des sols moyens humides (type D1) au ranch.

Phosphore

Les problèmes que posent le phosphore (P) sont très différents de ceux que posent l'azote. Le système sol-plante est presque fermé à P: il n'y a pas d'input à l'exception de l'input qui résulte de la fertilisation, tant que le recyclage de P dans la végétation est presque de 100%. Ce n'est que le P qui se retrouve dans les bêtes, ce qui peut être quelque 5% du P pâturé, qui constitue une perte nette. La quantité de P dans le sol est beaucoup plus grande comparé avec l'absorption annuelle, que la quantité en N. Les processus concernant la disponibilité de P sont de nature chimique, plutôt que biologique. La mobilité des ions phosphoriques est beaucoup moins grande que celle de N. La quantité de P dont les plantes ont besoin est le dixième de la quantité de N (en grammes). La mobilité moins grande fait que le développement des racines est plus entrelacé avec l'absorption de P qu'avec l'absorption de N. Ni le processus chimique, ni le processus biologique ne sont suffisamment clairs. Les changements dans la balance de P se réalisent beaucoup moins vite que dans la balance de N, et la seule manière d'y excercer une

semble être par moyen de fertilisation. C'est pour cela qu'on a porté un intérêt spécial aux questions: quelles sortes de sols ont besoin de P, et quelle(s) quantité(s)? Dans les zones tempérées on a établi des relations empiriques entre la proportion de P dans le sol (ou une fraction de la proportion) et la disponibilité de P aux plantes. Néanmoins il y a un danger dans l'extrapolation de cette connaissance aux régions semi-arides du Sahel parce que les valeurs de P dans le sol se trouvent à la limite inférieure de l'échelle empirique et parce que la relation empirique peut être fausse quand les circonstances sont différentes. D'autres méthodes d'évaluer l'état de P du sol ont été développées à cet effet. Les plantes ont besoin de P, donc il est évident qu'on peut observer l'absorption de P par les plantes, afin de pouvoir juger de sa disponibilité. Les proportions de P et de N peuvent varier considérablement sous l'influence des conditions de croissance. Comme il arrive souvent que P et N soient tous les deux des parties constituantes d'une combinaison chimique ou pourrait s'attendre à une certaine analogie. Recherches de M. Dijkshoorn apportent des indices certains.

Voici l'hypothèse:

$P/N_p < 0,015$	: la plante souffre d'un grave déficit de P
$0,015 < P/N_p < 0,025$	: la plante souffre d'un déficit de P
$0,025 < P/N_p < 0,050$	: la plante n'a pas suffisamment de P
$0,050 < P/N_p$	: la plante a suffisamment de P

P et N sont en mmol kg^{-1} . N_p représente la quantité de N en protéines, qui est estimée à 80% du total de N organique. Dans le cas où les proportions en N sont grandes ($2000-3000 \text{ mmol kg}^{-1}$) il est nécessaire d'élever ces limites en ajoutant $20/N_p$. Vu l'absorption de P qui est chez les jeunes plantes, toujours plus lente que l'absorption de N c'est le déficit de P qui se manifeste le plus souvent chez les jeunes plantes. Les plantes qui fixent le N très énergiquement sont toujours au dessous de la limitation de P. Ce sont donc ces deux catégories qui doivent être analysées afin de découvrir les sols pauvres en P. Dans une phase ultérieure on pourrait développer une méthode nouvelle d'analyse chimique du sol, une méthode qui donnera des résultats aussi sûrs qu'ils sont proposés plus haut, une méthode directe et biologique. Contrôle des résultats obtenus régulièrement d'analyses des plantes démontrera dans quelle mesure les limites mentionnées peuvent être appliquées aux pâturages naturels du Sahel. Les premières indications sont que l'esquisse décrite est en effet applicable mais aussi que les exigences nutritives peuvent être différentes pour des espèces différentes. Fonio, par exemple, pousse très bien quand le rapport P/N est extrêmement bas. Diheteropogon est une espèce qui peut très bien servir d'indicateur de déficit de P. Expérimentalement on a recherché

quelle quantité de P était nécessaire pour obtenir une certaine augmentation de la production. Les types de sol S1, S2 et D1 ont reçu du P en quantité variable de 0, 22, 45 et 90 kg P ha⁻¹ (sous forme de phosphate triple super (PTS) ou phosphate naturel de Tilemsi (PNT)). Les résultats seront publiés sous peu (Sidibé, 1978). PTS stimule la production avec 0,4% kg⁻¹ P jusqu'à la dose maximale en P sur les types de sols S2 et D1 et PTS stimule d'environ 0,7% kg⁻¹ P sur S1. La contribution des légumineuses à la biomasse était toujours moins de 20%, et il n'y avait pas une corrélation entre leur part relative et l'élévation de la production. PNT a stimulé la production de matière sèche 2 à 3 fois moins, mais les suites de la fertilisation sont probablement plus importantes que celles qui résultaient de la fertilisation de PTS. Tout cela doit être confirmé par la littérature et par des observations en plein champ. On a constaté une diminution de la récolte par suite de la fertilisation la plus élevée de P (presque 700 kg d'engrais à l'hectare), et il est possible qu'il s'agisse d'un endommagement causé par la concentration du sel.

La fertilisation de P exerce son influence directement et indirectement sur les espèces individuelles du champ.

L'effet direct est l'effet d'une nutrition améliorée des plantes et cet effet est grand dans *Diheteropogon* et dans *Schoenefeldia*, mais faible dans *Loudetia*. Des légumineuses fixant le N en profitent encore beaucoup plus.

L'effet indirect est l'effet de compétition. Cet effet est illustré très clairement par *Zornia*, qui est fortement stimulé en direct par le P, mais *Zornia* est supprimé dans la végétation aux cas où l'application de P est élevée parce que les autres plantes poussent plus en hauteur et *Zornia* est mis à l'ombre. *Borreria* est éliminé de la même façon. Les deux effets sont à la base des changements dans la composition floristique des pâturages qui se manifestent à la suite de la fertilisation. On s'efforce d'observer de tels changements aux champs où on a appliqué du P (100 kg P ha⁻¹) en 1976.

L'EAU

La pluie étant un don du ciel, ce sont les processus d'infiltration, l'écoulement d'eau, le rassemblement d'eau, drainage, et évapotranspiration qui déterminent la quantité d'eau dans le sol. Les caractéristiques physiques du sol même déterminent la fraction de l'eau souterraine qui est disponible à la transpiration et ainsi à la production primaire. Il est évident que le Sahel est loin d'être homogène en ce qui concerne ces processus. La variabilité spatiale est plus de règle qu'une exception. Donc on se demande sur quelle échelle on doit étudier l'hétérogénéité dans ce projet (PPS). Actuellement on fait des recherches à deux échelles assez différentes.

A petite échelle, l'échelle sahélienne on distingue de large unités de terre, comme par exemple: le delta vif, le delta mort, des bandes de dunes, des plateaux latéritiques et dépressions argileuses et limoneuses.

Au ranch de Niono on fait à grande échelle des analyses chimiques et physiques du sol; l'analyse des précipitations, des études de la croûte au surface, études de la balance d'eau souterraine consistant entre autres à des mesures de la proportion réelle de l'eau souterraine en faisant usage de sources à neutrons, et à estimer l'écoulement d'eau et l'évaporation, et à faire des investigations sur des sols dégradés.

Unités sahéliennes

On a utilisé les informations fournies par la littérature, par les photographies prises par satellite, et par des expéditions. En coopération avec les écologistes, on essaiera d'établir une corrélation entre les types de sols de ces larges unités et la végétation, basé sur la dynamique de l'eau pluviale/l'eau souterraine. Les remarques préliminaires sur le Sahel du Mali: le delta vif, une unité unique au Sahel est inondé annuellement par les eaux montantes du Niger. Il consiste en une vaste plaine argileuse aux rives sablonneuses qui protègent contre les hautes eaux et de plus en plus de dunes sablonneuses parallèles au Nord du delta. Il sert de pâturage au gros bétail de transhumance pendant la saison sèche et il possède aussi de grandes potentialités agricoles. Il exerce une grande influence sur les niveaux des eaux environnantes, par exemple sur l'approvisionnement en eau du village Nara, à 200 km du delta, qui est approvisionné en eau transportée par une aquifer qui vient du fleuve Niger. La région des dunes au Nord du delta se compose de dunes jaunes et rouges, de sable pur et de sable limoneux. La capacité d'infiltration est grande, et l'écoulement d'eau est négligeable. Ceci a pour résultat qu'il n'a pas de mares temporaires pendant la saison des pluies. La végétation est assez homogène; celle des sommets et celle des dépressions ne diffèrent presque pas et ces régions ne sont presque jamais pâturées. Les arbres trop clair semés ont naturellement souffert énormément de la grande sécheresse. Les plateaux latéritiques ont une végétation très irrégulière, parfois une vraie brousse tigrée. Les endroits nus alternent avec les brousses denses, ce qui s'explique probablement par l'écoulement d'eau et le rassemblement d'eau. Ceci a aussi pour résultat que les mares sont pleines et en conséquence la région est pâturée. Les dépressions limoneuses et argileuses sont les restes d'une longue histoire des fleuves de la plupart de la région sahélienne. On les trouve autour de la frontière entre le Mali et la Mauretanie (Mema ou Sahel) et dans le Nord du terrain du delta mort (Nema). Ce sont-là les régions de pâturage de la transhumance par excellence. Les sols gras sont presque imperméables, de sorte que la couche supérieure reste très mouillée pendant la saison des pluies. On suppose

Tableau 2. Qualités physiques et chimiques des couches arables des sols différents à

Niono, Mali. Explication des unités cartographiques: figure 1.

Complexe	champs des dunes			plaines limoneuses		dépressions d'argile		
unités cartographiques	S1	S2	S3	L	W	D1	D2	V
profondeur d'échantillon (cm)	0-10	5-15	10	5-15	20	0-15	20	20
Argile < 2 μm %	5.9	3.7	8.9	9.8	9.9	30.8	41.4	57.0
Limon 2-50 μm %	20.2	14.6	26.4	30.1	36.0	34.4	24.6	26.2
Sable fine 50-105 μm %	60.6	29.2	47.8	24.9	27.0	17.1	10.4	5.8
Sable > 105 μm %	13.8	52.2	16.9	32.5	27.1	17.8	23.6	11.0
Densité de volume g cm^{-3}	1.53	1.56	1.65	1.52	1.52	1.44	-	-
Contenu d'eau à								
(vol %) pH 1.0	40.2	32.1	-	-	-	37.2	-	-
2.0	25.4	18.5	23.8	27.9	20.0	24.4	-	-
2.5	13.0	11.0	-	-	-	24.0	-	-
3.0	6.3	4.4	-	-	-	24.0	-	-
4.2	3.6	2.5	-	-	-	15.7	-	-
pH H_2O -	6.1	6.1	6.0	5.8	5.0	5.8	5.3	5.9
pH KCl -	5.3	5.1	4.8	4.3	4.0	4.1	3.7	4.3
EC (1:5) mmho/cm 25°C	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05
CEC (pH 7) me/100 g sol	2.25	1.13	2.75	3.55	2.75	8.46	9.28	17.58
Ca % de complexe	66	61	57	54	33	42	22	45
Mg % de complexe	26	27	30	23	19	33	28	36
K % de complexe	8	10	4	3	4	4	4	5
Saturation de base %	100	98	92	80	56	79	54	86
C %	0.56	0.25	0.25	0.35	0.40	0.34	0.33	0.44
N total %	0.017	0.007	0.018	0.021	0.020	0.027	0.105	0.041
P total ppm	135	65	74	79	87	123	114	170
P (Bray 1) ppm	7	3	1	1	2	2	1	2
K ppm	78	43	47	47	47	121	145	343

que ces régions reçoivent de l'eau écoulee des plateaux latéritiques environnants. Le delta mort est une forme fossilisée du delta vif, mais le paysage a été modifié au quaternaire et ce sont surtout des dépôts éoliens de sable et de limon. C'est sur une telle unité que se situe le ranch de Niono où la diversité locale en ce qui concerne les sols et en ce qui concerne la végétation donne la possibilité de réaliser des expériences sur dunes sablonneuses tout comme dans des dépressions argileuses. On considère ces dernières nommées comme représentatives pour les larges unités du Sahel.

Une caractéristique du delta mort est sa platitude relative avec ses élévations mineures de dunes d'un maximum de 10 mètres. La région ne sert pas de réservoir d'eau mais toute l'eau écoulee est distribuée localement ou l'eau est conduite à une des nombreuses mares. Une étude détaillée (Fig. 1) a montré l'existence de différentes dunes sablonneuses, de dépressions argileuses ou limoneuses et d'intermédiaires nommés plaines limoneuses. Quelques résultats des analyses de sol du ranch sont donnés en Tableau 2. Afin de pouvoir estimer les potentialités pour la production, il est nécessaire de connaître les quantités d'eau écoulées du sol et les quantités d'eau rassemblées dans le sol et ceci pour chaque type de sol. Le fait d'avoir une idée claire sur les caractéristiques de l'écoulement d'eau et du rassemblement d'eau peut aussi aider dans la construction des mares semi-naturelles et bon marché. En plus de cela, il sera possible de déterminer des critères sur les dimensions des mares, de telle manière que les précipitations annuelles et la production primaire entre en relation avec la quantité d'eau du surface qui est disponible pour le bétail en créant ainsi un système écologique auto-contrôlé.

Les différents types de sols peuvent être reconnus facilement sur photographies aériennes et celles-ci faciliteront beaucoup l'extrapolation des résultats du ranch aux autres parties du Sahel.

Analyse des précipitations

En 1977 on a mesuré les précipitations au laboratoire météorologique à Niono, avec 5 pluviomètres non-enregistreurs et 2 pluviomètres enregistreurs au ranch le long d'une distance de 10 à 30 km à l'est du laboratoire météorologique. Un aperçu des données trouvées est donné au Tableau 3.

Tableau 3. Tableau des données de pluviométrie près de Niono en 1977.

mois	station météo à Niono		ranch sable (S2)		ranch argile (D1)	
	mm	jours	mm	jours	mm	jours
mai	39.2	3	15*	1*	19.8*	1*
juin	60.6	6	42.5	5	28.0	6
juillet	91.1	8	68.6	6	66.2	8
août	233.6	13	184.7	11	203.0	12
septembre	80.2	7	65.2	7	66.2	7
total	504.6	37	376.0	30	383.2	34

* estimé

Tableau 4. La repartition des précipitations en 1977 en relation avec les averses d'intensités diverses.

pluie d'une intensité	1-10 mm ha ⁻¹	24% du total
"	" 15-30 "	21% " "
"	" 40-70 "	37% " "
"	" 100 "	20% " "

Tableau 5. La repartition des précipitations en 1977 en relation avec les averses de différentes empleurs.

averses	< 10 mm	26% du total
"	10-20 mm	35% " "
"	20-30 mm	19% " "
"	> 30 mm	21% " "

Des averses qui n'atteignent pas les 10 mm ne sont souvent pas bénéfiques. Les averses supérieures à 30 mm peuvent donner beaucoup d'eau au sol mais ces averses se présentent souvent dans une période de grande intensité des précipitations de sorte que l'écoulement d'eau est considérable. La corrélation entre la quantité de pluie d'une averse et son intensité est faible. Comme il est impossible d'étudier l'écoulement d'eau sans tenir compte de l'intensité de l'averse, l'emploi des pluviomètres enregistreurs est nécessaire. Des différences de 100% étaient constatées entre les niveaux des pluviomètres qui n'étaient qu'à une distance de 10 km l'un de l'autre, et la conclusion en est qu'il ne faut que prendre les enregistrements près du champ d'expériences. Les variations vues dans une période d'un an sont

beaucoup moins grandes, mais elles sont toujours notables. Les valeurs des précipitations annuelles enregistrées au ranch à une distance de 20 km d'eau de surface tendent à être plus basses que les valeurs enregistrées à Niono, au milieu des champs irrigués. Ceci suggère une influence positive exercée par les grandes quantités d'eau et des champs irrigués sur le régime des pluies.

Croûte de la surface

On est frappé par la quantité relativement très grande de limon dans les sols de la région du delta mort, quand on compare les données de Fig. 2 à celles qui sont données dans la littérature sur le Sahel. On suppose que c'est par ce fait qu'il faut expliquer la présence extensive des algues et le mycelium à la surface du sol qu'on peut observer clairement à l'aide d'une loupe binoculaire. Ces algues produisent un lacis de fibrilles qui relie les particules du sol. Le résultat en est qu'il y a une croûte de surface qui n'est pas seulement une résistance purement physique à l'infiltration mais qui est aussi hydrophobe. Cette répulsion d'eau s'explique par les produits de détérioration des algues et le mycelium mort. La combinaison d'hydrophobie et une surface très compact est responsable de la capacité d'infiltration souvent très petite dans des conditions naturelles des précipitations et donc aussi responsable de la grande quantité d'eau écoulee même sur les champs qui ne sont accidentés que faiblement. La quantification de la capacité d'infiltration naturelle est difficile puisque les mesures classiques faites à l'aide de l'infiltromètre à anneau ne tiennent pas compte du caractère hydrophobe de la surface, l'infiltration se réalisant sous une pression (non-naturelle) positive d'eau à la surface du sol. L'usage d'un simulateur de pluie est inévitable et sera employé en 1978.

Etudes sur la balance d'eau souterraine

Définissant la capacité au champ comme l'humidité à pF 2,5, il se trouve que la majorité des sols à une capacité restreinte de fixation d'eau: moins que 10% (Tableau 2). Les densités des sols sont assez grandes, indiquant ainsi la sensibilité de tous les sols quant à compaction et à la compression. La conductibilité saturée a été observée plus tôt (Stroosnijder, 1977), mais s'est trouvé être de petite valeur au ranch parce que les caractéristiques de la croûte de surface ont une influence décisive sur tous les processus importants.

On a estimé l'écoulement d'eau tout comme l'évapotranspiration à partir de données sur l'eau souterraine et de pluviomètres enregistrateurs. On a fait ces enregistrements sur différents types de sols et dans des conditions différentes de fertilisation. L'humidité du sol est mesurée à l'aide d'une source à neutrons. Le nombre de mesures étant suffisant on peut distinguer un nombre de cas types

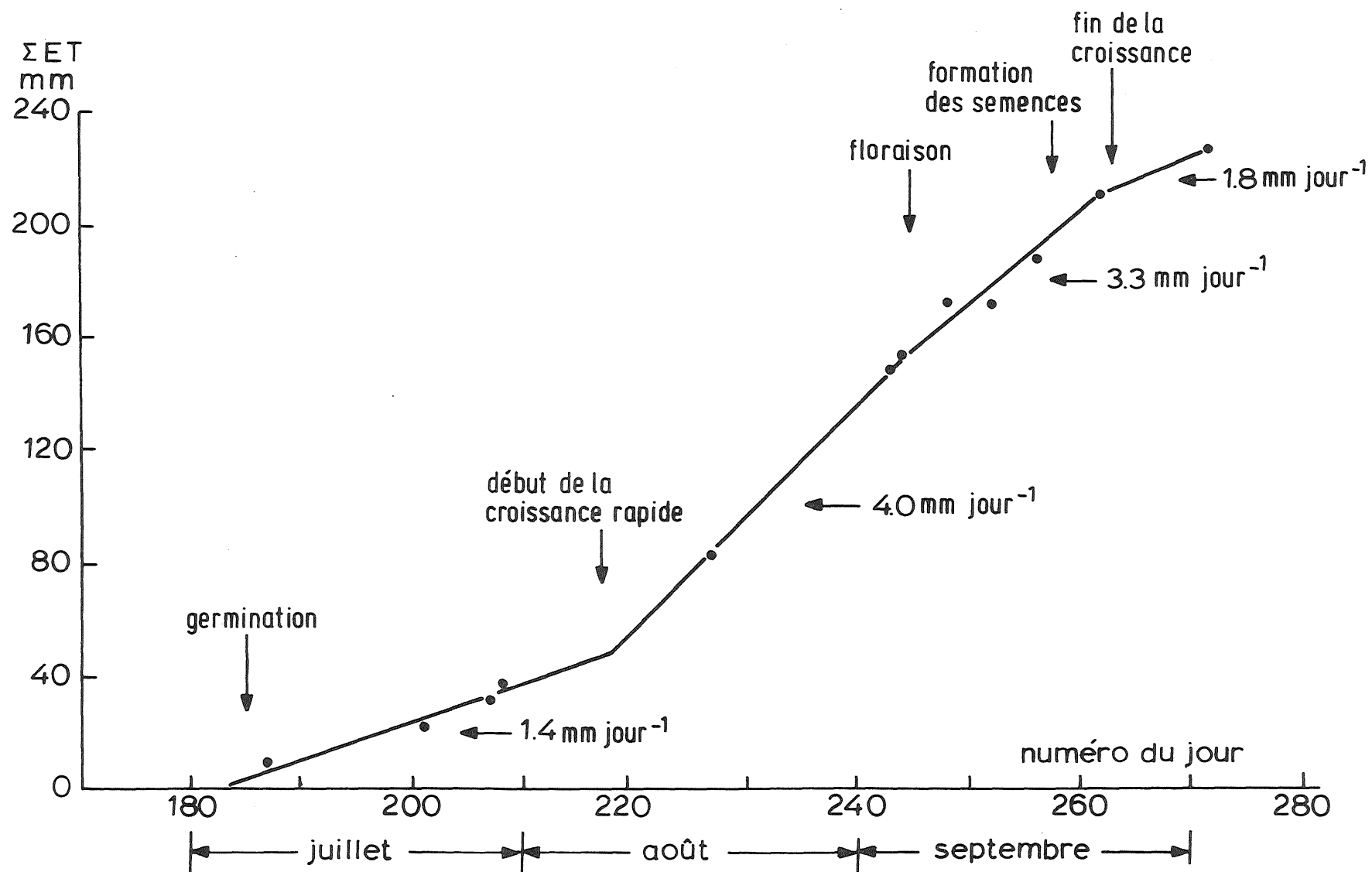


Fig. 5. Evapotranspiration pendant la saison de croissance dans une expérience sur un sol sablonneux (S2) en 1977. La pente du champ est inférieure à 1%. L'écoulement d'eau était toujours de 21% du total des précipitations.

d'écoulement d'eau à l'aide desquels on peut établir une relation utile entre l'intensité des pluies et l'écoulement d'eau. On utilise cette relation dans le calcul de l'évapotranspiration actuelle (ET). Les résultats de 1977 confirment ceux de 1976 (Stroosnijder, 1977) c'est à dire que l'ET pendant une période de croissance de 150-200 kg matière sèche ha⁻¹ jour⁻¹ est de 3-4 mm par jour. Cela veut dire que les espèces sahéliennes utilisent l'eau souterraine disponible de façon très efficiente. Des études sur l'écoulement d'eau et le rassemblement d'eau sont faites dans une région de 12 ha avec des pertes de 3% et où l'écoulement est de 80% et avec une dépression centrale où le rassemblement d'eau est de quelques centaines de pourcents. Néanmoins les études de la balance d'eau dans d'autres champs a donné aussi des informations utiles. Même dans une région relativement plate et sablonneuse (pentes 1%) il est normal que l'écoulement d'eau soit de 30%. Les dépressions argileuses donnent un autre type de l'écoulement d'eau. Dans une région presque plate et horizontale on trouve jusqu'à 25 reliefs par ha d'une altitude de 10-50 cm et ayant une surface de 10-100 m². Sur la plupart des reliefs pousse un arbre ou un arbuste et une activité considérable de termites y est souvent associée. Par le fait que ces élévations sont nus et qu'il n'y a pas d'infiltration d'eau, l'écoulement d'eau sur ces élévations peut conduire à un rassemblement d'eau de 10-20% dans les régions environnantes. Ces chiffres doivent encore être confirmés.

Il est difficile de distinguer entre E et T avec les données disponibles. Il semble nécessaire d'approfondir les connaissances sur E, particulièrement sur le E au début d'une saison de croissance. Dans ce cas-là c'est sa connaissance qui peut aider à prédire la germination des annuelles et la quantité des plantules qui survivront. L'E du sol détermine aussi le nombre de jours pendant lesquels la surface du sol reste suffisamment humide pour que les algues qui fixent le N puissent être actives. L'évaporation de l'eau souterraine peut aller de zéro sur les sols secs jusqu'à la valeur potentielle sur les sols humides sans couverture de végétation. La relation entre E et les caractéristiques du sol et le temps est bien connue et peut être prédite à l'aide des modèles à simuler (Shaykewich et Stroosnijder, 1977) bien que la présence d'une croûte d'algues peut gêner l'applicabilité du modèle aux sols étudiés. La couverture végétale laisse pénétrer souvent 50% ou plus de la radiation solaire jusqu'à la surface du sol, même quand la biomasse aérienne est maximale de sorte que la réduction de l'évaporation du sol causée par la végétation est loin d'être complète. Tout de même, des figures ET obtenues des études de la balance d'eau souterraine (p.e. Fig. 5) indiquent des valeurs basses d'ET au début et à la fin de la période de croissance ce qui veut dire que les valeurs d'ET pendant cette période sont encore plus basses. Une analyse plus détaillée de la courbe de l'ET (p.e. Fig. 5) indique que la germination sur sols

argileux a toujours lieu (en 1976 et en 1977) deux semaines après la germination sur sols sablonneux. Evidemment la germination ne commence pas avant que l'humidité du sol n'ait dépassé largement le point de flétrissement. Un sol argileux a besoin d'une quantité beaucoup plus grande avant qu'il ne dépasse cette limite. La croissance de beaucoup d'espèces s'arrête pendant la seconde moitié de septembre sous l'influence de contrôle photopériodique. Normalement l'eau souterraine n'est pas encore épuisée à ce moment-là sous la végétation où dominent les graminées. En 1976 où il y avait un régime de pluies normal tout comme en 1977 (une année sèche), beaucoup de sols du ranch contenaient encore 50 mm ou plus d'eau souterraine disponible le 1^{er} octobre. Les plantes qui ont une période de croissance illimitée, par exemple les légumineuses *Blepharis*, graminées perennes, arbustes et arbres, utiliseront cette fraction qui se trouve dans le sol. La plupart des annuelles ne bénéficie pas des pluies à la fin de la période de croissance, mais les pluies au début de cette période font prolonger leur cycle de croissance.

REGIONS DEGRADEES

La productivité primaire est basse partout où il y a trop de gros bétail rassemblé. Une fois que la couverture de végétation est peu développée, la région a tendance à se détériorer de plus en plus jusqu'à devenir nue. Des régions dénudées sont présentes autour de chaque village sahélien et autour des abreuvoirs, et les régions s'étendent de 100 à 500 mètres de ces sites. A une plus grande distance la production est toujours basse et la végétation diffère de la composition à une distance de 5 à 10 km des sites où le bétail ne vit pas (Breman et Cissé, 1977). Ce sont particulièrement ces sols nus qui sont très importants vu le danger d'amplification des régions non-productives et sauvages. Des études sont faites sur la manière dont on pourrait régénérer une végétation productive sur ces sols infertiles. L'urgence de telles études est soulignée par les résultats récents du projet CIPEA (non-publiés) qui démontrent que la dégradation progresse à grande vitesse dès 1950 dans la région à l'est du Canal du Sahel près de Niono. Les sols dégradés au ranch sont des sables limoneux à la surface, dur et avec des microdunes de sable fin d'une hauteur de 5 à 20 cm et d'une surface de 1-10 m². L'infiltration d'eau dans ces dunes n'est pas gênée par une croûte hydrophobe et est donc très grande. Mais une pente, même très faible des régions d'à côté amène un écoulement d'eau de presque 100% et la conséquence en est que ce sont ces sols-ci qui restent secs. Il y a quelque végétation sur les microdunes, et cette végétation en combinaison avec toutes les autres irrégularités de la surface fixe le sable mouvant et fixe les graines. Quand cette végétation n'est pas pâturée il y a une possibilité de restituer la végétation d'une telle région en 10-20 ans dans la plupart des cas. L'isolement est impossible vu l'importance de ces régions. Il y a de la littérature

sur les diverses manières de traiter le sol, par exemple labourer avec semis et planter, dans des conditions différentes et avec leurs différents degrés de succès.

On a expérimenté deux méthodes de régénération de la végétation. La première consistant en des labours intensifs des surfaces du sol et ensuite semis d'une graminée commune *Schoenefeldia*, et une graminée cultivée. *Digitaria exilis* (Fonio) à raison de 20 kg ha^{-1} . Ceux-ci ont donné des résultats excellents: une dense couverture du sol de presque $5000 \text{ kg matière sèche ha}^{-1}$ et l'écoulement d'eau était réduit presque à zéro. Il n'y avait pas de légumineuse de sorte que c'est la minéralisation qui est responsable des $50-100 \text{ kg N ha}^{-1}$ absorbé par la culture. Ceci suggère une minéralisation qui est 5 fois plus grande que pourrait prédire des analyses du sol. Fertilisation de P a encore doublé la production, tant que la fertilisation de N n'a pas eu d'effet.

On a aussi semé *Digitaria* en petits poquets. Les graines ont été mélangées à de petites quantités de P et de N et du sable et on les a placés dans un petit poquet à une profondeur de 1-2 cm. Environ 25% des poquets ont produit des plantes, bien que ce ne soit pas toujours celles qu'on avait semées. Les plantes qui se développaient étaient toutes de bonne qualité, démontrant de nouveau que ce n'est pas la fertilité du sol qui constitue le problème le plus important et démontrant aussi que les poquets sont capables de rassembler suffisamment d'eau pour les plantes. On recherchera si l'effet sera un effet qui se renforce chaque année. Il semble utile de continuer les recherches sur les poquets car la méthode n'est pas chère. Afin d'optimiser l'usage de poquets on fera aussi des recherches sur la variabilité spatiale. Ce n'est pas uniquement en vue des problèmes de l'écoulement d'eau, mais aussi parce que les irrégularités spatiales peuvent jouer un rôle important dans la restauration de la structure du sol et de la végétation. Une étude détaillée sera publiée sous peu, y compris des mesures précises des niveaux, de différences de capacité d'infiltration et des manières d'écoulement sur la surface. En 1977 on a expérimenté avec labour manuel afin d'augmenter l'infiltration et afin de réaliser que la surface peut retenir les graines apportées par le vent et en 1978 on fera le labour mécanique. Sur les microdunes, il y a beaucoup d'espèces originaires et *Zornia* est dominant. La production de ces dunes est d'environ $200 \text{ kg matière sèche ha}^{-1}$. Aucune réaction sur la fertilisation de N a été observée, tant que P avait un effet assez positif (20-50%). Il n'y avait pas une réaction significative avec K et S. Un détail intéressant est que les plantes n'ont pas donné de récolte plus grande malgré le fait qu'ils ont eu accès au sol limoneux fertile. Il faut admettre qu'il y a des endroits ou des trajets où il n'est pas possible de restituer la végétation en permanence parce que l'influence du bétail est trop grande, mais la régénération peut avoir une grande valeur dans beaucoup

de cas. Quand on aura trouvé que la grande fertilité des sols dégénérés du ranch n'est pas un cas exceptionnel, il vaut la peine de réaliser la régénération par des cultures de mil plutôt que par des cultivatures d'espèces pâturages naturels ou fonio, afin de restituer un terrain productif. Une autre solution réside dans la production de foin d'une haute qualité comme moyen de régénération.

LITTERATURE CITEE

- Bennema: Référence non-spécifiée dans rapport de Janssen, 197..
- Breman, H. and A.M. Cissé: Sahelian pastures in relation to drought and grazing. *Oecologia*, 28, 301-315, 1977.
- Breman, H., L. Diarra, M.I. Cissé and M. Togola: Les pâturages tropicaux africains. *Proceedings Symposium CIPEA*, 195-213, 1975.
- Boudet: Manuel sur les pâturages tropicaux et cultures fourragères. Manuels et précis d'élevage. I.E.M.V.T., Ministère de la Coopération, Rép. Française, 1975.
- Cissé, M.I.: Influence de l'exploitation sur la qualité d'un pâturage soudano-sahélien. Thèse 3^o cycle C.P.S., Bamako, 1976.
- Diallo, A.: Thèse 3^o cycle C.P.S., Bamako.
- Jenkinson: Référence non-spécifiée dans une note de Van Keulen.
- Keulen, H. van: Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 1975.
- Keulen, H. van and C.T. de Wit: Actual and potential herbage production in arid regions. Internal report Dept. Theoretical Production Ecology, Agricultural University, Wageningen and I.B.S., Wageningen.
- Le Houerou, H.N. and C.H. Hoste: Rangeland production and annual rainfall relations in the mediterranean basin and in the African sahel-sudanian zone. *J. Range Management*, 30(3), 181-189, 1977.
- Merlier, H.: Etude phénologique des espèces de jachère du centre-Senegal. *L'agronomie tropicale*, 12, 1229-1251, 1972.
- Power, G.T.: Nitrogen management of semi-arid grasslands in North America. *Plant Nutrition and soil fertility*, 468-471, + 1969.
- Rundell:
- Sidibé, M.: Effet de phosphate sur la production et composition floristique des pâturages naturels du Sahel. Thèse 3^o cycle, C.P.S., Bamako.
- Soderlund, R.: NO_x pollutants and ammonia emissions, a mass balance for the atmosphere over N.W. Europe. *Ambio* 6(2-3), 118-122, 1977.
- Stroosnijder, L.: Aspects of soil and water in the Sahel in Mali. Internal report PPS, 1977.
- Shaykewich, C.F. and L. Stroosnijder: The concept of matric flux potential applied to simulation of evaporation from soil. *Neth. J. agric. Sci.*, 25(2), 63-82, 1977.
- Traoré, G.: Thèse 3^o cycle C.P.S., Bamako.
- Veen, J.A. van: The behaviour of nitrogen in the soil. Ph.D. thesis Wageningen, 1977.
- Villecourt, P.: *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 12(4), 667-680, 1975.
- Wit, C.T. de: Simulation of assimilation, transpiration and respiration of crop surfaces. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, 1978.

