

prudemment que la transpiration de la végétation naturelle est environ 2/3 de sa transpiration potentielle (c'est-à-dire: sans régulation), mais aussi 2x plus élevée que sa valeur minimale.

Les valeurs de la transpiration de la fig. 4.4.7a indiquent peut-être aussi que la transpiration continue après la maturation de la végétation. Cette perte d'eau mérite une attention spéciale dans une prochaine expérimentation parce qu'elle diminue le stock d'eau du sol, et les espèces encore vivantes n'en profitent moins.

Pour faire un contraste, la productivité du même pâturage mais avec fertilisation a été simulée avec le modèle dans sa forme standard. Les résultats sont ajoutés au tableau 5.2.1. Ils montrent qu'à une productivité beaucoup plus élevée, l'évaporation est réduite, la transpiration stimulée et l'évapotranspiration ne change guère. Les conséquences de la fertilisation des pâturages sur le bilan d'eau sont généralement faibles, ce qui confirme un point de départ des parties 2.3 et 4.1. Mais au début de la saison de croissance, la différence entre les parcelles fertilisées et les parcelles naturelles peut être beaucoup plus grande, surtout quand la couche supérieure du sol est sèche. Les plantes ayant reçu de l'engrais sont déjà beaucoup plus grandes à ce moment, et absorbent l'eau des couches plus profondes sans réduction importante de la transpiration. Les parcelles naturelles avec peu de plantes perdent peu de l'eau, parce que l'évaporation d'un sol dont la couche supérieure est sèche est fortement réduite (partie 4.4.2.4). Ceci fait que, par fertilisation, la végétation devient plus sensible aux périodes sèches, surtout au début de la saison. Nous l'avons constaté aussi dans nos essais. Cet aspect défavorable de la fertilisation doit être bien reconnu pour la pratique.

5.3 LES PROCESSUS DU BILAN D'AZOTE

5.3.1 Introduction

On a constaté dans la partie 5.2.3 que la végétation des pâturages naturels n'absorbe de l'azote (N) que 10-35 kg ha⁻¹ an⁻¹ du sol pendant une saison de croissance. Pourtant, le stock de N dans la couche supérieure du sol est de 300-3.000 kg ha⁻¹. Il n'y a qu'une petite fraction du N-total qui est disponible pour les plantes, apparemment. La quantité absorbée par les plantes n'est pas une fraction constante de ce qui se trouve dans le sol, comme on constate de la comparaison de la fig. 5.2.9 et du tableau 3.3.3: le sol argileux D1, le plus riche en N, donnait les résultats dans la partie gauche du graphique, le sol sablonneux S2, le plus pauvre en N, donnait les points au milieu du graphique, et le sol limoneux (L) avec un taux moyen de N, donnait les points à droite. Dans la partie 5.3.2 on discute les processus qui rendent du N du sol disponible pour les plantes, et on essaie de les quantifier pour arriver à une base permettant de calculer la productivité des pâturages. Pour comprendre des changements de la productivité à long terme à cause de l'épuisement ou l'enrichissement du sol, on discute dans les parties 5.3.3 et 5.3.4 les processus qui augmentent ou diminuent le stock de N du sol. L'ensemble de ces processus et les stocks des formes diverses de N dans le sol et les plantes est appelé le 'bilan d'azote'. La fig. 5.3.1 présente un schéma de ce bilan. On y distingue 2 formes de N dans le sol: N_{inorganique} (N_{inorg}, c'est-à-dire NH₄⁺ et NO₃⁻) et N_{organique} dans la matière

Fig. 5.3.1. Un diagramme du bilan de N des pâturages naturels au Sahel. Les processus et les stocks de N les plus importants sont indiqués par une ∇ et un \square respectivement. Les chiffres dans les symboles représentent les intensités du processus en $\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ et les stocks en kg ha^{-1} à peu près au milieu de la saison de croissance à Niono.

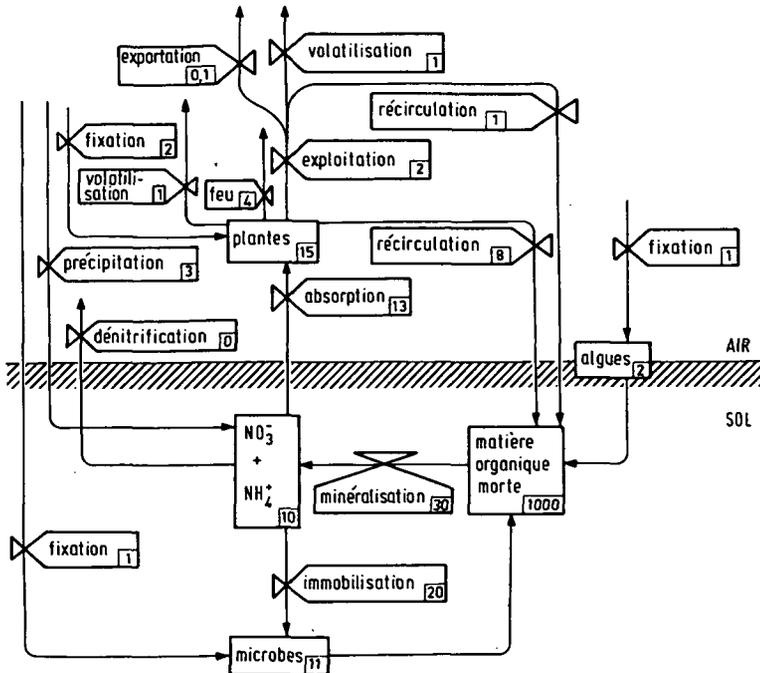


Fig. 5.3.1. A diagram of the N balance of the natural pastures in the Sahel. The most important processes and stocks of N are indicated by a ∇ and a \square respectively. The numbers in the symbols represent the intensity of the process in $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ and the stock in kg ha^{-1} about the middle of the growing season at Niono.

organique 'morte' du sol et des plantes et des micro-organismes du sol (N_{org} , surtout des protéines et dans la lignine). Les processus du bilan de N sont discutés séparément ci-dessous, mais sont intégrés avec d'autres informations dans les parties 5.5 et 5.6, et ils sont utilisés pour expliquer des phénomènes observés sur le terrain dans le chapitre 6.

Les quantités de N dans les processus du bilan de N sont faibles: souvent de l'ordre de quelques $\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. En plus, les vitesses des processus changent énormément dans des périodes de quelques jours. Aussi la connaissance théorique de ce qui se passe dans le sol n'est pas encore suffisamment développée. Ces facteurs font qu'il est difficile de mesurer l'intensité de tels processus dans le laboratoire et encore plus difficile de les mesurer sur le terrain. Les résultats présentés sont donc souvent inexacts, et les conclusions tirées doivent être utilisées avec prudence. A cause de ces difficultés, on ne peut que vaguement distinguer des différences entre les types de sol ou de végétation (à l'exception des légumineuses). Des données de la littérature sont utilisées pour compléter et évaluer nos résultats expérimentaux.

La quantité de N dans les parties aériennes de la végétation (N_b) est le résultat des processus dans le sol et de l'absorption par les plantes. (Notez que la variable N_b ,

employée ici, dans la partie 5.6 et dans le chapitre 9, est identique à N_e de la partie 5.2.1.) En moyenne, N_b , mesuré à la fin de la saison de croissance, augmente de 2 à 14 $kg\ ha^{-1}$ quand on voyage du nord au sud du Sahel. La fig. 6.3.1 le montre.

La variabilité de N_b à chaque niveau de la pluviométrie moyenne est élevée à cause de l'hétérogénéité des sols, la redistribution variable des pluies et la composition changeante de la végétation. Par analyse de données obtenues pendant 2-4 ans successifs sur les sites du trajet nord-sud, on constate que la variabilité est grande, même sur un endroit fixe: le coefficient de variation de N_b sur un site est 41%. Le coefficient de variation pour la quantité de P absorbée est encore légèrement plus. La valeur de N_b n'était pas en corrélation avec l'importance des légumineuses à ces endroits.

5.3.2 Transformations dans le sol

Fig. 5.3.1 montre les processus du bilan de N des pâturages qui sont les plus importants pour la production végétale d'une année. Les processus dans lesquels du N est transformé d'une forme à l'autre dans le système sol- plante sont: la minéralisation, dans laquelle de la matière organique est décomposée et du NH_4^+ est produit; l'immobilisation, dans laquelle du NH_4^+ est incorporé dans la matière organique; la nitrification, dans laquelle NH_4^+ est oxydé à NO_3^- ; l'absorption de NO_3^- et NH_4^+ par les plantes. Hormis l'absorption, tous les processus sont microbiens. Le retour de N_{org} des plantes dans le sol est aussi discuté.

Il y a des indications d'une décomposition thermique de la matière organique dans des sols secs et à des températures élevées (Janssen, comm. pers.). Ce processus n'est pas considéré ici, mais pourrait être analysé dans de prochaines études approfondies du bilan de N des sols des zones semi-arides.

5.3.2.1 Minéralisation et immobilisation

La croissance et la décomposition des microbes sont la base des transformations biologiques dans le sol, et ces processus ont donc un aspect N, un aspect P aussi bien qu'un aspect d'énergie (qui est contenu dans des molécules organiques, et est représenté par le C de carbone). Parce que les sols sahéliens sont en général pauvres en matière organique, N et P, parce que les microbes ont généralement une carence en N et en C, et parce que les plantes, fournisseurs du C, ont souvent une carence en N et en P, ces transformations doivent être considérées d'une façon intégrée. Nous discutons les aspects N et C ici et l'aspect P dans la partie suivante.

Aspect N Le sol est souvent caractérisé par le taux en C et en N de sa matière organique. La qualité de la matière organique est parfois indiquée par le rapport entre le poids de C et de N (C/N, $g\ g^{-1}$). Le rapport C/N des sols au Sahel varie de très bas (5) à certains endroits jusqu'à élevé (>40) à d'autres (tableaux 3.3.1 et 3.3.3).

Dans des sols des zones tempérées on observe une accumulation du NO_3^- et du NH_4^+ (quand il n'y a pas de plantes qui l'absorbent) si le rapport C/N de la matière organique du sol est inférieur à 20, et une immobilisation du N_{inorg} appliquée si le rapport C/N

est supérieur à 30. Ces valeurs de 20-30, qui font la séparation entre minéralisation nette et immobilisation nette, sont la conséquence du fait que

- le rapport C/N des bactéries et des champignons, qui causent ces transformations, est de 6 et 10 respectivement, donc environ 8 pour les microbes ensemble;
- les atomes de N ne sont transformés d'une forme organique à l'autre que dans ces processus;
- seulement 1/3 du C consommé par les microbes reste dans leurs structures moléculaires et 2/3 sont respirés et s'échappent sous forme de CO_2 .

Le rapport C/N critique a donc une valeur de 24. Mais ces chiffres ne sont qu'approximatifs: c'est pourquoi le trajet a une valeur de 20-30. Dans des sols tropicaux, on rencontre probablement la même situation.

La matière organique du sol a une composition très hétérogène des parties ayant un rapport C/N élevé et qui sont très résistantes à la décomposition (humus et paille enterrée: C/N = 50-100; racines mortes C/N = 40-60), et des parties avec un rapport bas qui sont décomposées facilement (les bactéries mortes, par exemple). C'est pourquoi les processus de minéralisation et d'immobilisation peuvent se dérouler parallèlement dans le sol en même temps, et c'est l'importance relative d'un processus à l'autre qui fait qu'il y a une minéralisation nette ou une immobilisation nette. Cette hétérogénéité de la matière organique du sol est la cause du fait que le rapport C/N moyen, comme déterminé dans des analyses pédologiques standardes, n'est qu'une première indication de sa qualité.

La vitesse de la minéralisation dépend de la quantité de matière sèche présente et de sa vitesse spécifique. La dernière est influencée fortement par l'humidité du sol, par la température, par la composition de la matière organique et par la composition minérale du sol. Ces facteurs influencent aussi la vitesse d'immobilisation. Trop peu est connu de chacun de ces facteurs pour bien quantifier ces processus. Clark et Paul (1970) constatent que la matière organique du sol est composée d'au moins 3 fractions: des parties dégradantes des plantes, une partie de la biomasse microbienne et l'humus qui consiste des composantes très résistantes. La première fraction est décomposée au moins 1x par quelques années, la deuxième dans 10-50 ans, et la troisième dans plus de 250 ans.

Dans des sols des zones semi-arides, il y a un autre aspect de ces processus qui est d'une grande importance. Birch (1958, 1959, 1960) a trouvé une stimulation forte de la minéralisation nette, accompagnée d'une évolution de CO_2 , quand le sol est mouillé après être exposé à des températures élevées dans des conditions sèches. Fig. 5.3.2 montre les cours schématisés de la minéralisation et l'immobilisation pendant l'hivernage, qui résulte dans l'excès temporaire de N_{inorg} dans le sol, observé par Birch.

Quelques observations de ce phénomène ont été faites au ranch à des endroits avec végétation. Leurs résultats sont présentés dans les fig. 5.3.3a et b. Les taux de NH_4^+ et de NO_3^- dans le sol, la base de ces figures, ont été déterminés dans des échantillons de 0-20 cm de profondeur qui étaient refroidies jusqu'à $\leq 4^\circ\text{C}$ et transportées à froid au laboratoire. La forme de l'excès temporaire de N_{inorg} dans le sol est clairement visible au sol argileux (bien qu'on ne le trouve pas au début de la saison), mais est moins claire au sol sablonneux. Placé dans la fig. 5.3.3 en dessus de la quantité de N_{inorg} dans le sol, le N est absorbé par la végétation. Il faut noter que la fig. 5.3.3 soit peut-être illustrative, mais elle ne prouve pas encore l'existence d'une succession des

Fig. 5.3.2. Le cours des processus de minéralisation (—) et de l'immobilisation sans végétation (-·-·-·-) et avec végétation (-·-·-·-) pendant la saison pluvieuse (a), et le résultat sous forme de N_{inorg} dans le sol (b). La figure n'est qu'un schéma simplifié.

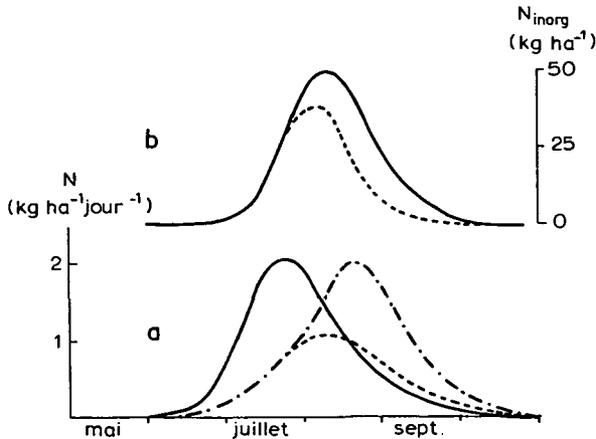


Fig. 5.3.2. The course of the mineralization (—) and immobilization processes without vegetation (-·-·-·-) and with vegetation (-·-·-·-) during the rainy season (a), and the result in the form of N_{inorg} in the soil (b). The figure is only a simplified scheme.

processus suggérés dans la fig. 5.3.2. La somme du N dans les plantes et le N_{inorg} dans le sol d'une pareille expérience monte même presque proportionnellement à la quantité de pluie tombée pendant la saison jusqu'à la floraison (fig. 5.3.4) ce qui pourrait indiquer aussi que la vitesse de la minéralisation nette est plus ou moins constante quand le sol est humide. Mais il y a une expérience au ranch, déjà discutée, qui présente un argument solide pour l'existence d'un excès temporaire du N_{inorg} dans le sol au début de la saison de croissance: une végétation qui avait précocement une grande biomasse, et qui avait donc précocement la capacité d'absorber beaucoup de N, contenait plus de N qu'une végétation qui se développait plus lentement (fig. 5.2.10). Le rapport P/N dans la dernière récolte des 3 espèces les plus lentes des parcelles fertilisées était supérieur à 0,08 indiquant que l'absorption n'était pas restreinte par un manque de P (partie 5.2.4), et leur taux de N était 1,3% en moyenne, donc l'absorption de N n'était pas non plus restreinte parce que la biomasse contenait déjà son maximum en N.) La diminution de la courbe supérieure de la fig. 5.2.10 indique probablement la phase où l'immobilisation est plus intensive que la minéralisation; la phase où la minéralisation était la plus grande n'y est pas visible, mais son résultat est très clair.

Il y a quelques hypothèses pour expliquer ce phénomène de l'excès temporaire:

- Une partie de la matière organique du sol est sous forme d'un gel. Pendant la période sèche, la structure du gel est désintégrée et la surface attaquable par les microbes est agrandie. Quand les sols sont humides, les structures des gels se reconstituent lentement dans les formes d'avant hiver.
- La sécheresse à des températures élevées cause une stérilisation partielle des sols. Quand les sols sont mouillés, la biomasse microbienne morte se décompose rapidement, et à cause de son rapport C/N bas il y a une minéralisation nette.

Fig. 5.3.3. Le cours des formes de N pendant la saison pluvieuse sur un sol argileux (D1, a) et un sol sablonneux (S2, b) sans fertilisation en 1977 au ranch. Les quantités de ces formes sont représentées d'une façon cumulative: la distance en dessous de la première ligne représente la quantité de NH_4^+ dans le sol; la distance entre la première et la deuxième ligne représente la quantité de NO_3^- dans le sol, et la distance entre la troisième et la deuxième ligne représente la quantité de N dans les parties aériennes et dans les racines des plantes. L'écart type de chaque point est environ 25%.

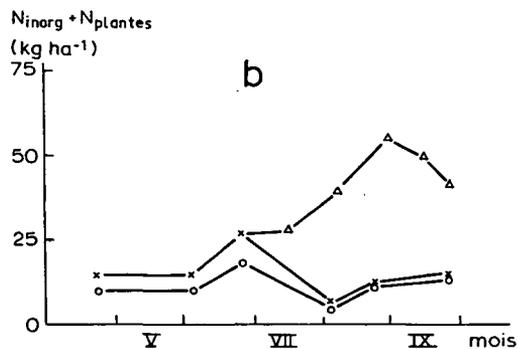
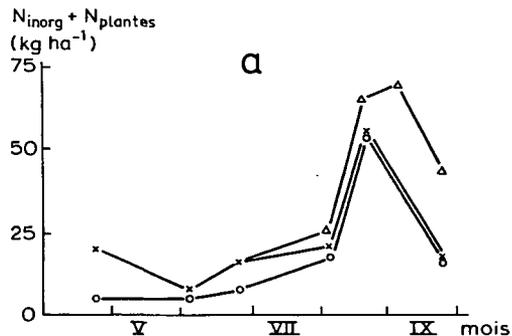


Fig. 5.3.3. The course of forms of N during the rainy season on a clayey soil (D1, a) and a sandy soil (S2, b) without fertilization in 1977 on the ranch. The quantities of these forms are represented in a cumulative way: the distance below the first line represents the amount of NH_4^+ in the soil; the distance between the the first and second lines represents the amount of NO_3^- in the soil and the distance between the third and second lines represents the amount of N in the aerial parts and in the roots of the plants. The standard deviation of each point is circa 25%.

L'existence d'un excès temporaire implique que la disponibilité de N_{inorg} n'est pas constante, mais montre un maximum pendant l'hivernage: des végétations tardives rencontrent une grande partie de l'excès déjà immobilisé, et les plantes qui sont précoces peuvent en absorber plus. Les plantes annuelles peuvent donc avoir des stratégies différentes: germer précocement pour pouvoir absorber beaucoup de N mais au risque de se dessécher avant de fleurir, ou germer tardivement et trouver moins de N, mais être plus sûr de survivre. Cette remarque est aussi valable pour l'agriculture du sorgho et du mil.

Bienque l'excès temporaire en N semble être important, son hauteur n'exprime pas directement la disponibilité de N pour les plantes: un taux bas de N_{inorg} dans le sol n'indique pas que la vitesse d'absorption est lente si la plupart du N_{inorg} est du NO_3^- , parce l'absorption de NO_3^- par les racines est très efficace et peut continuer à des taux très bas (Seligman et al., 1975). La continuation de la minéralisation jusqu'à la fin de

Fig. 5.3.4. La somme du N_{inorg} dans le sol plus le N dans la végétation (•) et la quantité de NH_4^+ (+) dans le sol en fonction de la pluviométrie cumulative (ΣPI) au cours de l'hivernage de l'année 1977 sur un sol argileux (a) et un sol sablonneux (b) sans fertilisation.

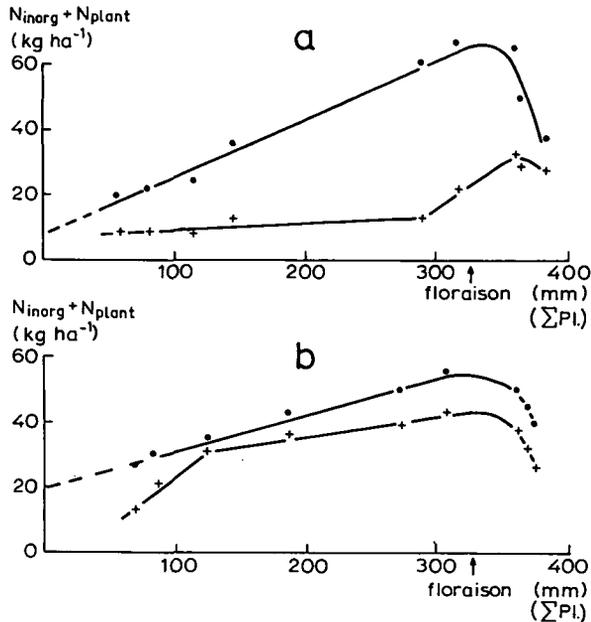


Fig. 5.3.4. The sum of N_{inorg} in the soil and the N in the vegetation (•) and the quantity of NH_4^+ (+) in the soil as a function of the cumulative rainfall (ΣPI) during the rainy season of the year 1977 on a clayey soil (a) and on a sandy soil (b) without fertilization.

l'hivernage permet l'absorption continue de N_{inorg} par les plantes, bien que l'absorption soit faite en compétition avec l'immobilisation par les microbes. La fig. 6.1.1 est un exemple de l'absorption du N pendant toute une longue saison par des graminées pérennes, la période d'absorption des graminées annuelles étant plus courte à cause de leur photopériodicité (partie 4.3.4.2). Les herbes pérennes, les arbustes et aussi les cultures céréalières profitent donc des saisons de croissance étendues.

L'importance du processus de l'immobilisation peut aussi être montrée avec une expérience de laboratoire, où l'on a mélangé de la paille broyée dans des sols et y ajouté du NO_3^- . Les résultats sont présentés dans la fig. 5.3.5. Après 2 jours d'incubation, l'immobilisation rapide de N s'arrête, ce qui est interprété comme l'épuisement des composants faciles à décomposer, dont le poids est estimé à 10-20% de la paille. Après cette phase, il y a une décomposition lente, qui peut être attribuée à la décomposition de hémicellulose, dont le poids est de 15-55% de la paille. Le reste se décompose encore plus lentement. De cette façon, on estime que 25-75% de la paille est décomposée en 100 jours pendant que la plupart du N est immobilisée. Autrement dit, on a employé de paille à l'équivalent de 22.500 kg ha^{-1} , dont 6.000-18.000 kg ha^{-1} est décomposé en 100 jours, et 120 kg ha^{-1} du 150 kg ha^{-1} de N appliqué est immobilisé; la moitié de l'immobilisation se passait en quelques jours seulement. L'immobilisation peut donc être très rapide. Application de P au sol pour stimuler l'immobilisation encore davantage n'avait aucun succès.

Fig. 5.3.5. La quantité de N_{inorg} ($NH_4^+ + NO_3^-$) dans le sol en fonction du temps de l'incubation. A temps 0, 15 g de paille et 100 mg de N ont été incorporés dans 1 kg de sol. Le sol était à la capacité du champs pendant l'expérience mais sec avant; la température était 30 °C (x: argile; •: sable).

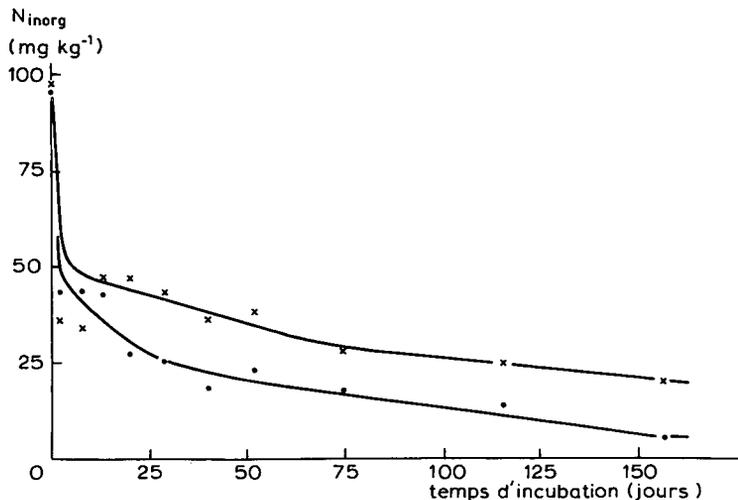


Fig. 5.3.5. The amount of N_{inorg} ($NH_4^+ + NO_3^-$) in the soil as a function of the incubation time. At time 0, 15 g of straw and 100 mg N were incorporated in 1 kg of soil. The soil was at field capacity during the experiment but was dry before; the temperature was 30 °C (x: clay; •: sand).

L'immobilisation de N peut aussi être étudiée avec les expériences de fertilisation: une partie du N appliqué qui n'est pas absorbée par la végétation est immobilisée. La fraction absorbée était caractérisée par r (partie 5.2.1); 0,2 du N de l'urée appliqué se volatilise à la surface du sol (partie 5.3.3.3), de sorte que $0,8-r$ représente la fraction maximale de l'immobilisation. Blondel (1971a, b et c) a constaté l'immobilisation complète de N_{inorg} après l'hivernage dans des sols nus. Mais Jansson (1958) a constaté qu'on trouve souvent du NH_4^+ qui reste dans des sols naturels. C'est évident dans la fig. 5.3.3 qu'il en reste aussi pendant la saison sèche au ranch. Un autre exemple le confirme: en ajoutant 300 kg ha⁻¹ de N (comme urée, avec 100 kg ha⁻¹ de P comme TSP.) à un sol argileux (D1) au ranch en 1976, on trouvait 158 kg ha⁻¹ de N dans les parties aériennes des plantes à la floraison, et 150 kg ha⁻¹ de N_{inorg} dans le sol à la fin de la saison pluvieuse. Parce que la fertilisation a été faite juste avant la grande croissance des plantes et parce que ces microbes ont une carence en C au lieu de N, on suppose que la fertilisation n'a pas influencé la minéralisation. Le témoin sans engrais contenait 46 kg ha⁻¹ de N_{inorg} dans le sol et 12 kg ha⁻¹ de N dans la végétation: la quantité de N immobilisée y est inconnue, mais il est improbable que ce soit plus que quelques dizaines de kg ha⁻¹. Avec l'engrais, donc, il y avait au moins $300 \times 0,8 + 58 = 298$ kg ha⁻¹ de N disponible; 308 kg ha⁻¹ est retrouvé dans les plantes et le sol. La différence est petite et est attribuée au hasard. Une pareille expérience sur sol sablonneux (S1) au ranch montrait 20 kg ha⁻¹ de N dans la végétation et 49 kg ha⁻¹ de N_{inorg} dans le sol sans fertilisation, et 136 et 160 avec fertilisation. La différence entre ce qui était disponible ($300 \times 0,8 + 69 = 309$) et ce qu'on retrouvait ($160 + 136 = 296$) est négligeable. On

conclut donc, que l'immobilisation n'était pas intensifiée sur ces sols par la fertilisation, et qu'elle était probablement moins que quelques dizaines de kg ha^{-1} de N.

Le N_{inorg} qui est resté dans le sol est disponible pour les plantes dans l'hivernage prochain. En supposant que dans la deuxième année, comme dans la première, la moitié du N_{inorg} était absorbée par la végétation, on s'attendait à 60 (D1) à 70 (S1) kg ha^{-1} de N dans la végétation au moins. Pourtant, on ne retrouvait que 30-50 kg ha^{-1} dans la végétation. Cette différence est considérée comme réelle, et est attribuée à l'immobilisation, stimulée par la présence de N_{inorg} ou bien par une augmentation de l'approvisionnement en

Fig. 5.3.6. La distribution de N_{inorg} sous formes de NH_4^+ (-----) et NO_3^- (——) dans un sol sablonneux (S1, a) et argileux (D1, b) à la fin de la saison pluvieuse (novembre 1976). Les sols ont été fertilisés avec N_1 à 300 kg ha^{-1} (urée). Les totaux intégrés de NH_4^+ dans ces profils sont 40 et 79 kg ha^{-1} respectivement, et 120 et 80 kg ha^{-1} pour NO_3^- .

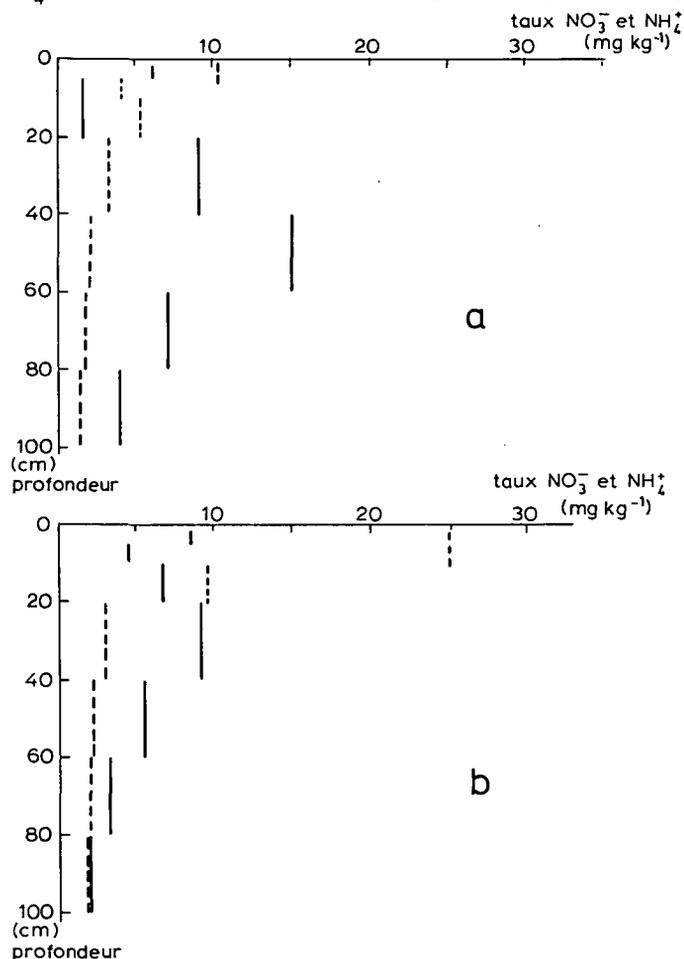


Fig. 5.3.6. The distribution of N_{inorg} in the forms of NH_4^+ (-----) and NO_3^- (——) in a sandy (S1, a) and clayey (D1, b) soil at the end of the rainy season (November 1976). The soils were fertilized with N_1 at 300 kg ha^{-1} (urea). The integrated totals of NH_4^+ in these profiles are 40 and 79 kg ha^{-1} respectively, and 120 and 80 kg ha^{-1} for NO_3^- .

C du sol.

On constate également que, grosso modo, la moitié du N_{inorg} se trouve encore dans le sol après l'hivernage sur les sols fertilisés et non fertilisés, un pourcentage considérable. La fig. 5.3.6 montre un exemple de la distribution du N_{inorg} dans les sols. La question intéressante pourquoi la végétation ayant une carence en N n'a pas absorbé tout le N_{inorg} , même pas à des doses d'engrais faibles, sera discutée dans la partie 5.3.2.4.

La quantité de N minéralisée dans ces sols non-fertilisés est de l'ordre de quelques dizaines de $kg\ ha^{-1}\ an^{-1}$. Il y a trop peu d'information pour généraliser sur la magnitude de l'excès temporaire de N_{inorg} dans les sols divers. La littérature (Birch, loc. cit.) et nos expériences indiquent qu'il y a une corrélation positive entre le contenu en N du sol et la magnitude de l'excès temporaire de N_{inorg} . Mais des facteurs comme le rapport C/N de la matière organique, la pluviosité et l'absorption par les plantes jouent certainement un rôle important dans la détermination de l'hauteur et de la durée de l'excès. Il va sans dire que la connaissance des mécanismes de la minéralisation et de l'immobilisation, ainsi que de leurs régulations et interactions et des effets de l'environnement exigent encore beaucoup d'attention dans des études plus approfondies sur la dynamique intra-annuelle du bilan de N.

Aspect C Une partie du C du sol peut être du carbone pur, le résultat des feux. Ce C est inert. Ici on ne parle que du carbone organique (C_{org}). Dans des sols pauvres en matière organique, le bilan de C_{org} est très important, parce que des changements relativement grands des quantités de C_{org} accompagnent des transformations de N. Les calculs présentés ci-dessous indiquent les quantités minimales de C_{org} en question. Ces quantités peuvent être estimées parce qu'on connaît approximativement la quantité nette de N dans ces processus et la quantité de C associée avec le N. Ce sont des valeurs minimales parce qu'on ne sait pas dans combien de temps pendant une saison la biomasse des microbes est désintégrée et est reconstituée dans d'autres bactéries. Les calculs ici sont basés sur l'idée que chaque molécule de N n'est minéralisée et immobilisée qu'une fois par saison.

L'immobilisation est l'assimilation de N dans des structures moléculaires des microbes. Leur consommation de C est donc $8\ g\ g^{-1}$ de N immobilisé pour la formation de la biomasse, et encore $16\ g\ g^{-1}$ de N qui est respiré pour fournir l'énergie de la croissance. Nous estimons que par minéralisation une pareille quantité du C est perdue du sol, donc $16\ g$ de C par g de N minéralisé.

Ces chiffres nous permettent de faire un petit calcul de la situation en équilibre en ce qui concerne le bilan de C_{org} . Quand l'immobilisation de N suit la minéralisation, le sol perd $32\ g$ de C_{org} par g de N. Si la minéralisation est suivie par une absorption de la moitié de ce qui était minéralisé (voir 'aspect N'), le sol perd $24\ g$ de C_{org} par g de N absorbé. Parce que minéralisation et immobilisation peuvent continuer simultanément, ces estimations sont basses, et on pourra argumenter facilement qu'elles sont plus élevées. A une productivité annuelle de $800\ kg\ ha^{-1}$ de parties aériennes avec environ $800\ kg\ ha^{-1}$ de racines, comme on le trouve dans la partie nord du Sahel, l'input de C_{org} dans le sol est $400-800\ kg\ ha^{-1}\ an^{-1}$, environ 50% de la biomasse étant du C_{org} . L'absorption de N est environ $10\ kg\ ha^{-1}$ pour les parties aériennes et $6\ kg\ ha^{-1}$ pour leurs racines ce qui correspond à une perte de 16×24 ou bien $400\ kg\ C_{org}$. Les plantes retournent donc dans

le sol une quantité de C_{org} au moins supérieure à celle qu'exige la consommation minimale. Dans la partie sud du Sahel, l'input de C_{org} vient avec 2.400 kg de paille plus 800 kg de racine, donc par ha 1.600 kg de C_{org} au maximum. Par exploitation, termites et feu, l'input annuel de C_{org} est souvent en dessous de 800 kg ha^{-1} . Cette quantité est aussi presque la même de ce qui est estimé sur base des observations des transformations de N: absorption de 20-40 kg de N correspond à 500-1.000 kg de C. En supposant que les sols ne sont pas en train d'appauvrir en matière organique, on doit donc constater que les pertes en C_{org} qui correspondent aux transformations en N sont presque égales aux pertes minimales.

Les sols contiennent par ha 3.000-15.000 kg de C (tableaux 3.3.1 et 3.3.3). Comparé avec les inputs et pertes annuels de C_{org} , ces quantités sont remarquablement petites. Il est évident que le taux de C du sol diminue significativement dans 5-10 ans si les transformations de formes de N continuent sans input de C_{org} , par exemple sur un terrain dégradé. Le contenu en N ne change pas en conséquence de tels processus, de sorte que le rapport C/N diminue. Les processus s'arrêtent probablement à des valeurs du rapport C/N d'environ 6, à en juger d'après les observations faites au Sahel (tableau 3.3.1). Le fait que la plupart des sols avec un rapport C/N bas sont des sols exploités intensivement soutient l'idée que les conséquences d'une diminution d'input de C_{org} dans le sol a des effets dans un nombre limité d'années.

De grandes pertes de C_{org} pendant une saison de croissance sur le terrain ont été citées dans la littérature. De telles pertes ont été observées aussi dans le laboratoire: on a mesuré l'évolution de CO_2 des sols nus après qu'ils étaient mouillés à la fin de la saison sèche (fig. 5.3.7). La vitesse de respiration du C_{org} du quatrième au dixième jour était constante et environ $1 \text{ g kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ sur un sol argileux (D1) et sablonneux (S2) et $3 \text{ g kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ sur un sol limoneux (L) et sablonneux (S1). Si continuées pour une période de 50-100 jours, ces vitesses résultent dans des pertes considérables.

Pour étudier sur le terrain l'effet d'un apport de matière organique sur les transformations dans le sol et sa fertilité, on a appliqué de paille à 6.000 kg ha^{-1} (3.000 kg ha^{-1} de C_{org} , 20 kg ha^{-1} de N et 2 kg ha^{-1} de P) et ailleurs $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de bouse fraîche (5.000 kg ha^{-1} de C_{org} , 100 kg ha^{-1} de N et 10 kg ha^{-1} de P) sur des sols argileux, sablonneux et limoneux du ranch. Des fois, la matière organique était mise sur le sol et enterrée par des termites et coléoptères, des fois on l'a enterrée tout de suite. Il est remarquable que toutes ces applications n'ont eu aucun effet significatif sur la productivité des végétations dans la première et la deuxième année après l'application. Cette matière organique appliquée se comporte donc comme de la matière organique du sol avec un rapport C/N élevé. La récirculation de N des plantes semble donc être lente, et la productivité d'une année n'est pas influencée par la quantité de N retournée dans le sol de l'année précédente. Mais ces observations au ranch très claires et faites à plusieurs répétitions contredisent l'avis de Clark et Paul (1970) que la biomasse des plantes est décomposée dans quelques années, la pratique de l'utilisation de la fumure par les paysans et l'observation dehors du ranch où la productivité d'une végétation était bien stimulée après qu'un troupeau y passait la nuit. Il manque une explication pour les résultats anormaux obtenus au ranch. Le plus probable est que la minéralisation a été stimulée aussi bien que l'immobilisation et que l'effet net est nul les premières années.

Fig. 5.3.7. La production cumulative de CO₂, exprimée en mg C par kg de sol, des types de sol du ranch après qu'ils sont mouillés.

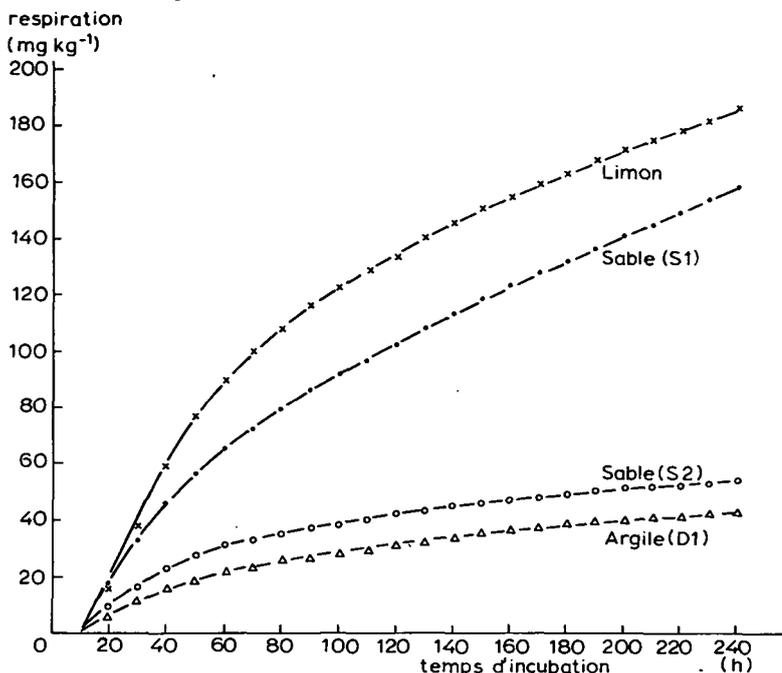
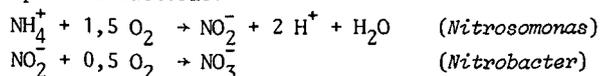


Fig. 5.3.7. The cumulative production of CO₂, expressed in mg C per kg of soil, of some soil types of the ranch after wetting.

La conception de la présence de 3 fractions de matière organique dans le sol, qui se distinguent par leur résistance à la dégradation, assiste à comprendre l'effet de jachère. Quand l'intensité d'exploitation d'un terrain est à un certain niveau depuis long temps, ces 3 fractions sont dans un 'équilibre dynamique': une partie de chacune est décomposée chaque année, et une pareille quantité est formée. Mais si la fraction la plus labile est épuisée par exploitation intensive pendant quelques années, plusieurs années de 'repos' sont nécessaires avant que cette fraction est reconstituée par décomposition progressive des fractions de matière organique plus résistantes. La reconstitution peut être accélérée par fixation de N par des légumineuses. La fertilité du sol est reflétée surtout par la fraction la plus facile à décomposer, et cette fraction est reconstituée pendant une période de jachère. Mais le sol en total appauvrit en N (et autres éléments), et la reconstitution par jachère n'est que partielle.

5.3.2.2 Nitrification

NH₄⁺ dans le sol peut être transformé en NO₃⁻ par des bactéries chemolitho-autotrophes. La transformation, appelée nitrification, se passe dans 2 phases, chacune exécutée par une espèce de bactérie:



Par ces réactions, les bactéries dérivent de l'énergie pour leur croissance. La vitesse de nitrification est déterminée par le taux de NH_4^+ , par la présence de matière organique, par l'humidité et le pH du sol, et par la température. Il n'y a pas de conséquences directes pour le bilan de C du sol, ni pour sa quantité de N_{inorg} . Les conséquences indirectes de la nitrification sont considérables, parce que la mobilité de NH_4^+ est plus petite que celle de NO_3^- . Ceci est très important pour l'absorption par les plantes et pour le lessivage.

Les déterminations de NH_4^+ et de NO_3^- dans quelques sols au ranch indiquent que seulement une partie du NH_4^+ est nitrifiée pendant une saison pluvieuse. Fig. 5.3.6 montre qu'environ 2/3 du N_{inorg} qui restait dans le sol après l'hivernage en 1976 était sous forme de NO_3^- et 1/3 comme NH_4^+ . Dans cette année, le sol était longtemps humide, permettant la nitrification de continuer jusqu'en novembre. Une indication indirecte de la lenteur de la nitrification sur le terrain est obtenue par la fig. 5.2.9, dans laquelle les efficacités d'application des engrais urée et NO_3^- ont été comparées. L'efficacité de NO_3^- est plus basse que celle d'urée dans des cas où dénitrification était importante (partie 5.3.4.4) et ceci n'est possible que si la nitrification n'a pas encore eu lieu.

La cause de la nitrification partielle des sols sans fertilisation peut être le taux trop bas de NH_4^+ (quelques mg kg^{-1} de sol). La présence de certaines formes de matière organique dans le sol a aussi une influence inhibitrice, comme les produits de décomposition partielle de la paille et des racines (Odu, 1970). On a constaté sur quelques types de sols au ranch que la nitrification de NH_4^+ (appliqué comme $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) est fortement inhibée à la présence de la paille en quantités considérables. NH_4^+ peut être absorbé par des minéraux d'argile (Van Veen, 1977). Mais les types des minéraux des sols sahéliens (voir partie 3.3.2) en absorbent très peu, donc l'absorption chimique n'est pas considérée comme la raison de la nitrification partielle. Jansson (1958) constate qu'il reste souvent du NH_4^+ dans des sols non-fertilisés.

5.3.2.3 Absorption par les plantes

Les plantes n'absorbent que du N_{inorg} du sol. Le processus de l'absorption est considéré comme étant parallèle à l'absorption de N_{inorg} par les microbes pendant leur croissance. Il y a donc une compétition directe entre des groupes d'organismes. On a constaté (partie 5.2.3) que les végétations annuelles absorbent environ la moitié du N_{inorg} appliqué sur des sols différents. Vu le fait que la végétation commence chaque année avec de toutes petites plantes avec des systèmes de racines très limités, c'est quand même une prestation remarquable. Pour des végétations pérennes, on pourrait s'attendre à l'absorption d'une fraction plus grande de N_{inorg} , parce qu'elles ont leurs racines déjà au début de l'excès temporaire.

NO_3^- , étant plus mobile que NH_4^+ , est absorbé le plus vite par les plantes. Les molécules arrivent avec l'eau qui coule vers les racines pour satisfaire la transpiration, mais surtout par diffusion. L'absorption quasi complète de NO_3^- du sol pendant l'hivernage (fig. 5.3.3) confirme que l'absorption de NO_3^- est très efficace: un système racinaire développé absorbe tout le NO_3^- formé dans le sol presque immédiatement (Seligman et al., 1975). L'immobilité de NH_4^+ fait que des molécules peuvent rester dans le sol sans être

'découvertes' par les racines (partie 4.5.5). Les grandes quantités de NO_3^- dans le sol après l'hivernage ne sont pas attribuées à une absorption moins efficace, mais

- à l'intensité de la fertilisation, qui apportait plus de N_{inorg} que les plantes pouvaient absorber;
- à la continuation de la nitrification après la maturation de la végétation.

Le taux de NO_3^- élevé au début de 1977 sur D1 (fig. 5.3.3) est aussi attribué à la nitrification, qui a pu continuer longtemps en 1976.

La plupart du N et une grande partie de la biomasse aérienne des plantes retournent dans le sol après l'hivernage. Les pertes de N considérables qui peuvent se passer dans cette période, ont été discutées ailleurs (partie 5.2.6).

5.3.3 L'apport de N

La fixation de N_2 gazeux par des organismes vivants est la source de N la plus connue. En plus, il y a du N inorganique qui vient surtout avec la pluie. L'intensité de ces processus est discutée ci-dessous.

5.3.3.1 L'apport d'origine atmosphérique

Un résumé de la littérature des formes de N dans l'atmosphère et leurs origines a été donné par Söderland et Svensson (1976). Le N de l'atmosphère existe sous plusieurs formes, dont les formes les plus abondantes (N_2 et N_2O) sont inertes. La déposition atmosphérique de N sur le sol et les plantes consiste principalement en NH_3 et NH_4^+ et NO_x . Ces molécules sont caractérisées par des temps de rétention dans l'atmosphère de 1-10 jours.

Le NH_3 de l'air est le résultat de volatilisation, un processus discuté dans la partie 5.3.4.3, et aussi de la combustion de charbon, de bois et de pétrole. Le NH_3 dissout dans l'eau des pluies. On estime que le taux de N des pluies du Sahel est en moyenne $0,3 \text{ mg l}^{-1}$, c'est-à-dire $3 \text{ g ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de pluie, sur base des données de Eriksson (1952), Meyer et Pampfer (1959), Richard (1964), Jones et Bromfield (1970), Villecourt (1975) et Bille (1977). Söderlund et Svensson (1976) ont observé que la déposition sèche (absorption par le sol et les plantes) est nulle dans les déserts, et pareille à ce qui se trouve dans les pluies dans les zones plus humides. Sur cette base, on estime que la déposition sèche de N est la moitié de la déposition par la pluie. Parce que la contribution de la déposition sèche est liée avec la durée que le sol et les plantes sont mouillées, nous supposons qu'aussi la déposition sèche est une fonction de la quantité de la pluie.

La formule générale de NO_x inclut NO , NO_2 dans les formes mono-, di- et polymoléculaires, et leurs acides correspondantes. Les sources de NO_x sont: la décomposition chimique de NO_2 dans les sols acides (le nitrite est un produit intermédiaire de la dénitrification et de la nitrification), la combustion du bois, du charbon et du pétrole; des décharges électriques dans l'atmosphère et des conversions chimiques dans la troposphère. L'anion prédominant dans la précipitation est NO_3^- . Sur base de la littérature indiquée ci-dessus, on estime qu'il y a $0,2 \text{ mg l}^{-1}$ de N sous forme de NO_3^- dans les pluies au Sahel, c'est-à-dire 2 g mm^{-1} . La déposition sèche de NO_x dans les zones tropicales est approxi-

mativement 10x moins que celle de NH_3 , et est négligée ici.

En total donc, on estime qu'avec 1 mm de pluie une quantité de N de $6,5 \text{ g ha}^{-1}$ est ajouté aux pâturages: chaque année $0,65 \text{ kg ha}^{-1}$ dans la partie nord du Sahel et $3,9 \text{ kg ha}^{-1}$ dans la partie sud.

5.3.3.2 La fixation biologique de N_2

Les processus de fixation biologique de N_2 de l'atmosphère sont discutés par ordre d'importance régressive.

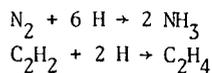
Les légumineuses Sur base de la littérature, et soutenu par nos observations au ranch et au laboratoire, on estime qu'en général 75% du N dans les légumineuses provient de la fixation de N_2 par les *Rhizobia* dans les nodules de leurs systèmes racinaires, et 25% provient de l'absorption du sol. Quand les légumineuses poussent sans compétition des graminées sur un sol déjà enrichi en N, ce pourcentage de fixation est environ 50%. Ces chiffres sont défendus dans la partie 6.2.2.

Les légumineuses forment en moyenne 5% de la biomasse de la végétation, c'est-à-dire du nord au sud du Sahel: $20\text{-}120 \text{ kg}$ de biomasse ha^{-1} des parties aériennes, et 50% de plus quand les racines sont incluses. Leur taux de N est environ 2,5%. Leur contribution au bilan de N des pâturages est donc de l'ordre de $0,4\text{-}3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Dans des zones surpâturées couvertes exclusivement avec du *Zornia glochidiata* et avec une production de $1.600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, comme au ranch, la contribution n'est pas non plus élevée à cause du fait que le sol y est relativement riche en N_{inorg} , ce qui empêche la fixation. C'est pourquoi on estime que la fixation de N est de l'ordre de $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Voir aussi partie 6.2.3.

Les algues Sauf sur des sols meubles dans la partie nord du Sahel, il y a presque partout des croûtes sur la surface du sol (partie 3.3.3). Dans les croûtes, il existe une flore alguale, dominée par les algues bleu-vertes, dont certaines espèces fixent N_2 . L'espèce la plus abondante est *Scytonema spp.*, une algue fixatrice, qui se protège contre la sécheresse par une gaine. Aussi *Nostoc spp.* (fixatrices) sont trouvées fréquemment. Moins fréquentes sont *Calotrix sp.*, *Anabaena spp.* et *Cylindrosperma spp.* La quantité de N_2 fixée pendant l'hivernage dépend de la fréquence des algues fixatrices, de la durée de la période que la surface du sol est humide, de l'intensité de la lumière et aussi de la concentration de N_{inorg} dans les croûtes.

La vitesse de fixation de N_2 des algues dans des conditions favorables a été mesurée au laboratoire. Pour cela, on a mis les croûtes, récoltées sèchement, dans des petits containers transparents. Après injection de 10% C_2H_2 , les containers, bien fermés étaient mis dans un grand réservoir d'eau, 1 cm au-dessous de la surface pour éviter une augmentation de la température. La production de C_2H_4 était suivie à l'aide d'un chromatographe à phase gazeuse. La durée de l'incubation était toujours moins que 6 heures. La vitesse de la production de C_2H_4 indique la vitesse avec laquelle N_2 est fixé, parce que l'enzyme nitrogenase catalyse les 2 réactions:



Sur base de ces réactions on suppose que la réduction de 3 mol C_2H_4 correspond à la réduction de 1 mol N_2 ; dans la littérature on trouve que ce rapport varie entre 2 et 5 en pratique. En présence de C_2H_4 , la réduction de N_2 est empêchée et on suppose que la vitesse de production de H est le facteur limitatif de la réaction. De cette façon, on a trouvé que la vitesse de réduction de N_2 par les algues devient constante 2 heures après que la croûte est mouillée, et est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-11} \text{ mol cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ le jour, et environ 1/3 de cette vitesse la nuit. La vitesse de réduction d'une croûte d'un sol sablonneux était un peu plus grande, celle d'un sol argileux un peu moins. La vitesse pendant la journée est plus grande que pendant la nuit parce qu'il y a plus d'énergie métabolique disponible. L'intensité de la réduction varie aussi d'une façon considérable pendant l'hivernage. Sur base des données de la partie 4.4.2.4, on a calculé la durée moyenne que la surface est humide le jour et la nuit. On trouve que, le jour, la surface est humide pendant 25 heures aux mois de mai, de juin et de juillet ensemble, 92 heures en août et 44 heures en septembre pour les jours, et 197, 144 et 361 heures respectivement pendant les nuits. Avec ces données, on estime que la fixation de N_2 par les algues était $1,7 \text{ kg ha}^{-1}$ en 1979 sur le sol sablonneux (S2) au ranch, et $0,2 \text{ kg ha}^{-1}$ sur le sol argileux (D1). Vu l'incertitude de ces données, on néglige la différence entre les types de sol et utilise seulement la moyenne. Parce que la quantité de N_2 fixée est liée fortement à la durée que la surface est humide, et donc à la quantité des pluies de l'hivernage, on estime que la contribution moyenne des algues au bilan de N aux pâturages au Sahel est 2 g mm^{-1} de pluie.

Les bactéries vivant en association avec les systèmes racinaires des plantes Il y a certaines espèces de bactéries, comme *Azotobacter spp.*, *Spirillum spp.* et *Clostridium spp.*, qui peuvent fixer du N_2 en vivant librement dans le sol. La source d'énergie est la matière organique du sol et les exudates des plantes. L'efficacité de la fixation de N, exprimée en g g^{-1} carbohydrates consommé, est basse: pour les bactéries qui sont obligatoirement anaérobies (comme *Clostridium pasteurianum*) l'efficacité est 0,01; pour *Klebsiella pneumonia* et *Bacillus polymixa*, des espèces qui sont facultativement anaérobies, l'efficacité dans les conditions anaérobies n'est que 0,005, et l'efficacité d'*Azotobacter sp.* dans des conditions aérobies varie de 0,01 (à 20% O_2) jusqu'à 0,05 (à 1% O_2 ; Mulder et Brotonogoro, 1974). Les conditions anaérobies dans les sols sahéliens sont rares, parce que les périodes où l'eau empêche la diffusion dans le sol sont brèves et la vitesse de consommation de O_2 y est relativement faible.

L'importance de la fixation de N_2 par des bactéries vivant aux environs des systèmes racinaires des graminées a eu beaucoup d'attention récemment (Döbereiner et al., 1978). Pourtant les résultats publiés ne sont pas sans équivoque. Pour estimer la contribution de telles bactéries au bilan de N au Sahel, un nombre d'espèces importantes ont été cultivées en vase sur des sols du ranch. La vitesse de réduction de C_2H_2 par les vases avec plantes a été mesurée en mettant les plantes non-perturbées dans de grands sacs en matière plastique avec 10% du volume de C_2H_2 pendant 12 heures. Des plantes des âges différents ont été mesurées. Les espèces annuelles investigées sont *Cenchrus biflorus*,

Chloris Prieurii, *Diheteropogon hagerupii*, *Eragrostis tremula*, *Loudetia togoensis*, *Panicum laetum*, *Pennisetum pedicellatum*, *Schoenefeldia gracilis*, *Borreria radiata* et *Blepharis linariifolia*. Elles étaient toutes cultivées en vases avec 10 kg de sol. Les pérennes, *Andropogon Gayanus* et *Vetiveria nigriflora*, étaient cultivées en vases contenant 27 kg de sol. Tous les sols étaient fertilisés avec du P pour mieux exprimer le résultat de la fixation éventuelle. La quantité de N fixée était faible dans tous les cas, et variait entre 0 et 5% du N dans les plantes. Cette quantité de N fixée est probablement proportionnelle à la productivité de l'espèce. La raison en est que ces bactéries vivent des exudates des racines et des racines mortes, dont la quantité est environ proportionnelle à la productivité des parties aériennes. L'incertitude des valeurs individuelles des espèces est trop grande pour attribuer aucune signification aux différences constatées entre les espèces. C'est pourquoi on estime que, en moyenne, une quantité de l'ordre de 0,2 kg de N₂ est fixée par les bactéries associées avec les racines des herbes non-légumineuses par production de 1.000 kg de parties aériennes.

Les bactéries libres Pour avoir une indication de la contribution au bilan de N de ce type de bactéries, qui n'ont aucune association avec les plantes, une expérience au laboratoire a été faite. On a mesuré la réduction de C₂H₂ d'une couche supérieure de 10 cm des sols du ranch sans et avec supplément de la paille broyée (7,5 g kg⁻¹ de sol à 0,3% N et 0,07% P) et sans et avec engrais (0,13 g kg⁻¹ et 0,2 g kg⁻¹ de N et de P respectivement, donné à part ou ensemble). Les observations ont continué 70 jours. La fixation sur des sols témoins était presque nulle. Avec de la paille, la fixation de N était de l'ordre de 8 g ha⁻¹ jour⁻¹ sur un sol sablonneux (S2), de l'ordre de 25 g ha⁻¹ jour⁻¹ sur limon (L) et de l'ordre de 2 g ha⁻¹ jour⁻¹ sur argile (D1). Le sol avec P et sans et avec de la paille montrait des chiffres pareils ou inférieurs à ceux de paille seulement; de la paille avec P et N ne montrait aucune fixation. Vu ces vitesses faibles du témoin et la grande quantité de la paille appliquée (environ 10x l'apport naturel), la contribution de N par les bactéries libres est estimée à 0,25 g ha⁻¹ kg⁻¹ de paille.

Termites La contribution des bactéries dans les intestins des termites à la fixation de N₂ a été mesurée en mettant un nombre de termites dans de petits containers avec 1% de C₂H₂. La production de C₂H₄, mesurée très exactement après quelques heures, était tellement faible que même à des nombres de quelques millions de termites ha⁻¹ (Ohiagu, 1979), leur contribution au bilan de N n'est que quelques dizaines de g ha⁻¹ an⁻¹, ce qui est négligé.

5.3.3.3 Fertilisation

La fertilisation avec de l'engrais ou de la fumure est un apport directe de N au pâturage. Deux aspects de la fertilisation doivent être rappelés ici:

- l'efficacité de la fertilisation, c'est-à-dire la quantité de N absorbée relative à la quantité appliquée, et son complément: le N qui entre d'abord dans les stocks divers de N du pâturage (fig. 5.3.1) mais qui est retrouvée ultérieurement dans la biomasse;
- la vitesse avec laquelle ce N devient disponible pour les plantes.

L'efficacité des engrais est très élevée en général, mais pas 100%: des engrais avec du N sous forme d'ammoniacque et aussi l'urée peuvent perdre 10-30% de leur N à cause de volatilisation de NH_3 si placés sur la surface. Plus la température, le pH du sol et la vitesse de sécher du sol après la pluie sont élevés, plus élevée est la fraction perdue; seulement quand l'engrais est incorporé dans le sol (plus de 10 cm) la perte est presque nulle. De nombreuses observations de ce genre ont été résumées par Terman (1980) et on adopte un pourcentage de perte de 20% dans nos calculs avec l'urée. Le nitrate n'est pas exposé à de telles pertes, mais peut être dénitrifié (partie 5.3.4.4). Les pertes de N de la fumure appliquée sur le sol sont probablement minimales (partie 5.3.4.1).

Les engrais azotés consistent ou forment du NO_3^- et du NH_4^+ , qui peuvent être absorbés par les plantes immédiatement. Ils ont donc un grand effet sur la productivité dès l'année de leur application, comme la fig. 5.2.9 le montre. La fumure organique exige d'abord la décomposition microbienne avant de produire du N_{inorg} . L'effet de l'application du fumure est donc étendu sur plusieurs années. Dans nos expériences au ranch, moins que 10% du N de la fumure était absorbé par les plantes dans 2 hivernages successives (voir aussi partie 5.3.2.1). Pourtant, dans le cas de fertilisation avec des engrais et aussi avec de la fumure, tout le N entré dans le sol devient ultérieurement disponible pour les plantes. Ou, autrement dit, dans une situation d'équilibre où les stocks de N dans le sol (fig. 5.3.1) ne changent plus, la quantité de N qui est ajoutée au sol par fertilisation est récoltée complètement la même année.

5.3.4 Les pertes de N

Les processus par lesquelles N est perdu des pâturages sont très divers: exploitation et feu, volatilisation de NH_3 du sol et des plantes, dénitrification de NO_3^- et érosion de N_{org} . Leur quantification est difficile, comme pour les apports de N, et cette partie ne fait qu'une estimation de leur importance dans les pâturages sahéliens.

5.3.4.1 Exploitation

Par fauchage et par broutage des animaux, du N des parties aériennes des plantes est récolté. Pourtant, seulement une petite fraction du N brouté est assimilée. Sa valeur est généralement de l'ordre de 5% pour les types des systèmes d'élevage considérés, comme discuté dans la partie 9.2.2. Le reste est expulsé dans l'urine et les matières fécales et une partie de ce N récircule dans le sol. Harpaz (1975) constate que les matières fécales contiennent 16-50% du N excrété (30% en moyenne), le reste se trouve dans l'urine. Une grande partie du N dans l'urine s'est volatilisée: 40% (Peterson et al., 1956), 45% (Watson et Lapins, 1964), 80% (Barlow, 1974). Stewart (1970) a constaté que 20% du N de l'urine s'est volatilisé quand l'urine est versée à un endroit neuf, mais 90% si l'urine est évacuée à maintes reprises au même endroit. La cause est l'augmentation du pH du sol par l'urine, qui stimule la formation du produit volatil, le NH_3 . Au ranch on a constaté que de tels endroits ont un pH de 8-9 (mais on a mesuré également que la fraction de N volatilisée n'y était que quelques pourcents du N dans l'urine).

Les excréments du bétail ont une teneur d'environ 1% en N sur la base de matière

sèche. Cette matière organique, qui a un rapport C/N de 50, exige beaucoup de la décomposition microbienne avant qu'il y ait une accumulation de NH_4^+ qui peut causer du volatilisation. Avant que ce moment soit arrivé, la plupart des matières fécales sont incorporées dans le sol par des termites ou de coléoptères. Pour cette raison, la récirculation du N des fèces est presque complète.

En résumant, on estime qu'en moyenne 50% du N expulsé par les animaux est retourné dans le sol, et 50% est perdu comme NH_3 à l'air. Mais il est aussi évident que ce rapport récirculé/perdu peut varier de 3:1 jusqu'à 1:2 selon la condition de la surface du sol. Il est évident aussi que la récirculation du N consommé par les animaux tombe jusqu'à zéro quand les animaux broutent sur un pâturage et déposent leur urine et fèces ailleurs.

5.3.4.2 Feux

Tout le N dans la paille est perdu comme N_2 ou NO_x quand les plantes sont brûlées, donc $5-30 \text{ kg ha}^{-1}$. Dans les pâturages à graminées annuelles, le feu brûle presque toutes les herbes quand la biomasse dépasse 1.000 kg ha^{-1} dans le stade mûr et sec, mais il n'y a pas un feu chaque année. Si la végétation n'est pas suffisamment dense et si des parties gros, comme les tiges, sont encore humides, la biomasse ne brûle pas bien et complètement, surtout quand les feux sont relativement précoces (novembre, décembre). De cette façon, jusqu'à la moitié du N dans les parties aériennes peut échapper au feu. Dans la partie 6.5 on en parle plus amplement.

5.3.4.3 Volatilisation de NH_3 des plantes

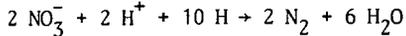
Dans la partie 5.2.5, on a présenté des informations qui indiquent qu'il y a des pertes de N des plantes sèches d'environ $1 \text{ g kg}^{-1} \text{ jour}^{-1}$, donc environ 25% du N dans les parties aériennes par année. Ceci correspond à $1-4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Très peu est connu également de la volatilisation de NH_3 des plantes pendant la période humide. La putréfaction des feuilles des légumineuses qui tombent sur le sol et qui y décomposent pourrait être importante sur les pâturages naturels: ces feuilles sont riches en N, et leur rapport C/N bas permet une décomposition microbienne rapide et la formation de NH_4^+ . Nous avons constaté que le pH de telles feuilles est presque pareil à celui de la surface du sol (5-7) quand il y a peu de feuilles, mais il s'élève jusqu'à 8,5 avec beaucoup de feuilles décomposantes, ce qui se passe par exemple quand la végétation se couche. De ces informations vagues il est difficile de préciser la quantité moyenne de N volatilisé et sa variabilité. La quantité volatilisée des plantes pendant la saison pluvieuse peut être $0-3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$; le chiffre exact dépend surtout de la pluviosité à la fin de l'hivernage. De telles estimations ne sont pas du tout extrêmes: Denmead et al. (1976) ont trouvé en Australie, que la volatilisation des pâturages non exploités et riche en légumineuses était en 30 jours environ 10 kg ha^{-1} . Voir aussi partie 6.2.

La volatilisation de N de la biomasse pendant la période sèche et humide ensemble est estimée d'être de l'ordre de $2 \text{ g kg}^{-1} \text{ an}^{-1}$ d'une végétation non-exploitée ou brûlée, dont approximativement la moitié dans la saison pluvieuse et la moitié dans la saison sèche.

5.3.4.4 Dénitrification

Quand il y a du NO_3^- , de la matière organique et une condition anaérobie dans le sol, des bactéries spécifiques peuvent réduire NO_3^- suivant la réaction:



La vitesse de cette réaction peut être quelques dizaines de $\text{kg ha}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ dans des conditions favorables pour ce processus. Pourtant, la combinaison des conditions nécessaires est rare au Sahel: il y a peu de matière organique, la concentration de NO_3^- est souvent très basse, et des conditions d'anaérobiose se développent rarement. En plus, la constante de la réaction, k_s exprimée comme le taux de N-NO_3^- dans le sol, est de $5\text{-}50 \text{ mg kg}^{-1}$ (Kohl et al., 1976), de sorte que le taux de NO_3^- des sols sahéliens non-fertilisés est généralement trop bas pour permettre une dénitrification rapide. Parce que la végétation absorbe le NO_3^- d'une façon très efficace, le taux est surtout bas pendant le mois d'août, quand le risque d'un écoulement abondant est le plus grand. Une condition anaérobie peut se développer seulement quand le sol devient très humide ou même saturé de l'eau, ce qui bloque la diffusion de O_2 ; les racines et micro-organismes consomment alors la faible quantité de O_2 qui restait dans le sol. Sur base de ces données et considérations, on estime que la dénitrification dans des pâturages naturels est négligeable, en général.

Les terrains avec un sol argileux ou limoneux et avec écoulement, qui sont fertilisés intensivement, font souvent exception. Déjà dans la partie 5.2.2 on a constaté que l'efficacité de la fertilisation avec NO_3^- était souvent plus faible que de la fertilisation avec urée, ce qui est attribué à la dénitrification d'une grande partie du NO_3^- . Des pertes de la moitié du N appliqué ou plus peuvent se produire parce qu'il y avait encore beaucoup de NO_3^- dans le sol au moment où une condition anaérobie se développait. Ce phénomène est aussi bien connu ailleurs (Van Keulen et Van Heemst, 1981) et la possibilité de dénitrification doit être investiguée d'avantage là où l'on propose la fertilisation comme mesure pratique afin de pouvoir éviter au maximum la dénitrification.

Suivant la théorie, la dénitrification est faible sur des sols très pauvres en matière organique décomposable. Une telle situation se produisait probablement dans l'essai qui donnait le point (0,75, 10) dans la fig. 5.2.9: l'efficacité de NO_3^- était élevée, et les plantes ont absorbé peu de N du sol non-fertilisé avec N (sans carence en P ou autres éléments), donc il s'agissait d'un sol très pauvre en matière organique décomposable. A cause de l'écoulement, il y avait de l'eau stagnante dans cet essai pendant 5 jours ou plus et il est très probable qu'il y avait une condition anaérobie.

Dans les considérations suivantes du bilan de N des pâturages (parties 5.5 et 5.6), on a négligé la dénitrification. Mais dans des études pour des zones spécifiques, on doit donner encore attention à ce processus, surtout après fertilisation avec NO_3^- sur des sols avec écoulement d'eau.

5.3.4.5 Lessivage

En dehors des dépressions, l'eau ne s'infiltré presque jamais à plus de 1-2 m de profondeur dans les sols du Sahel. Cela implique que les sels, parmi lesquels NO_3^- , ne sont presque jamais transportés hors de la portée des racines des herbes et des arbres et

en conséquence il n'y a pas de pertes de N par lessivage. Le NH_4^+ et aussi le N_{org} sont même trop immobiles pour le lessivage. La fig. 5.3.6 montre un bon exemple.

5.3.4.6 Erosion

Il y a des pertes de N par transport du sol par le vent et par l'eau. Le sol transporté provient surtout de la première couche et est relativement riche en matière organique. En général, l'érosion est plus grande quand il y a peu de végétation et beaucoup de vent, comme dans la partie nord du Sahel. Mais souvent aussi les sols avec peu de végétation sont ceux qui forment le plus facilement des croûtes et ils sont alors bien protégés contre l'érosion. Une estimation expérimentale de l'érosion n'a pas été faite dans le cadre du P.P.S. Voir aussi la partie 3.3.2.

5.4 LE PHOSPHORE DANS LE SOL ET SON ACCESSIBILITE AUX PLANTES

5.4.1 Introduction

L'importance du phosphore (P) pour la croissance et pour la productivité des végétations a été montrée dans la partie 5.2 avec des expériences au ranch, et sa base physiologique a été indiquée. Aussi sur les pâturages au-dehors du ranch, on a constaté que la fertilisation avec du P a souvent un effet positif sur la productivité: de telles observations sont résumées au tableau 5.4.1. Dans ce tableau on voit que la biomasse totale de 17 terrains fertilisés avec du P (comme triple super phosphate, TSP) à 100 kg ha^{-1} et observée pendant 2 années a augmentée 19x des 27 observations, dans 5 cas il n'y avait pas un changement et dans 3 cas il y avait une réduction. En négligeant les chiffres des sites les plus secs (les numéros 28 et 29) où l'eau est le facteur limitatif, on élimine encore la moitié des cas sans effet positif. Dans 17 cas, il y avait des légumineuses dans ces pâturages: 10x il y avait un effet positif, 1x sans changement et 6x une réduction. Dans la partie 6.2 on parle plus amplement de ces résultats. Ici on constate que la fertilisation avec du P a eu un effet positif dans la plupart des cas, qu'une carence en P est commune au Sahel malien, mais aussi que les différences entre les endroits et les années sont grandes. Sur quelques terrains, la fertilisation a eu lieu 1-2 années avant les récoltes présentées dans le tableau 5.4.1. L'effet de la fertilisation persiste donc quelques années au moins. Vu la similitude des sols de toute la zone sahélienne, nous attendons que ces phénomènes sont généraux au Sahel.

Dans cette partie, nous discutons les formes de P et les transformations dans le sol qui rendent le P disponible ou indisponible pour les plantes, l'absorption du P, et les conséquences à long terme pour le bilan de P par des modes d'exploitation. Nos recherches expérimentales n'ont pas permis de prêter beaucoup d'attention au processus de l'absorption du P, et encore moins aux transformations du P dans le sol. Cette partie est surtout basée sur la littérature, dont Innis (comm. pers.) faisait une étude qu'il a résumé dans un modèle à simuler. Il se base surtout sur 2 études approfondies: celle de Cole et al. (1977) des transformations de P dans des formes organiques dans le sol, et celle de Beek (1979) qui a étudié la dynamique des transformations de P dans des formes inorganiques.