

LE CYCLE DE L'AZOTE DANS LES AGRO-SYSTEMES DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

G. Hainnaux
Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, BP 51, Abidjan, Ivory Coast

Abstract

The nitrogen cycle comprises all the transformations that this element is subject to in the biosphere. Most of these transformations are carried out by microorganisms and their agricultural importance is considerable in that they regulate the nitrogen balance in the soil and the nitrogen available to the plants in a mineral form.

In an agroecosystem where the objective is to produce, the nitrogen cycle is influenced by management practices. African agriculture is characterized by cropping systems, which have a very varied intensification in their management, and the importance and frequency of the influence on the nitrogen cycle are very variable.

An evaluation is made of the different components of this cycle: the importance of different pools and determination of the annual fluxes are evaluated based on literature data for systems in a crop rotation.

Introduction

Le cycle de l'azote concerne l'ensemble des transformations subies par cet élément dans la biosphère. La plupart sont d'origine microbienne et leur importance agricole est considérable dans la mesure où elles régissent le bilan de l'azote dans le sol et conditionnent la mise à la disposition des plantes des formes minérales.

Dans un agrosystème dont l'objectif est de produire, ce cycle subit la pression des techniques culturales exercées par l'homme dans le cadre des systèmes de cultures qu'il met en place. L'agriculture africaine se caractérise par la juxtaposition de systèmes de cultures présentant des niveaux d'intensification très divers, l'importance et l'incidence de ces pressions sont très variables. Par ailleurs, si la mise en valeur agricole du milieu se traduit par la rupture des équilibres naturels originels, l'installation de cultures pérennes arbustives semble permettre le plus souvent le rétablissement d'un équilibre stable du fait de la faible fréquence des interventions. Avec les cultures annuelles, l'évolution peut être fort différente. En effet, l'intensification et les diverses interventions culturales qu'elle implique, résultant plus de choix devenus nécessaires au niveau de la planification que d'une progressive évolution de la pratique agricole, peut se traduire par la dégradation rapide des qualités d'un milieu généralement considéré comme fragile compte-tenu de l'agressivité des facteurs climatiques et de la rapidité des cycles biologiques.

Une évaluation moyenne des principales composantes du cycle de l'azote: impor-

tance des différents pools et mesure des flux annuels, sera dégagée des données bibliographiques pour d'une part les systèmes traditionnels et d'autre part les systèmes améliorés, essentiellement ceux constitués de cultures entrant en rotation.

L'agriculture traditionnelle

Les systèmes mis en place dans le cadre de cette pratique vont de l'agriculture itinérante sur brûlis à une agriculture alternant périodes de culture à périodes de jachère plus ou moins longues selon la pression démographique locale. L'importance relative de ces deux périodes peut être illustrée par le coefficient d'utilisation des sols tel qu'il est défini par Allan (1965) qui est de l'ordre de 2 à 6.

L'alimentation azotée des plantes

La cycle interne de l'azote: Dans ces systèmes, le taux d'azote total du sol tend vers un équilibre dont la valeur est déterminée par le rapport entre pertes survenant essentiellement lors de la phase de culture et gains qui prédominent en phase de jachère.

Les apports d'engrais sont nuls et l'alimentation azotée des plantes est dépendante du cycle de minéralisation des réserves organiques du sol. Celles-ci sont très variables selon les zones écologiques: de 0,051 % en moyenne (variation de 0,008 à 0,290 %) pour les sols de savanes (Jones, 1973) elles atteignent des taux doubles ou triples en zone forestière. Ainsi, les teneurs observées en basse Côte-d'Ivoire par Bernhard-Reversat (1976) varient de 0,95 à 2,94 %. Sous jachère au Ghana, Nye (1958) note des taux variant de 0,033 à 0,303 % et des variations de stock dans les 25 premiers centimètres allant de 800 à 6400 kg ha⁻¹.

Ces réserves sont minéralisées à des taux annuels variant entre 2 et 5 % (Charreau & Fauck, 1970). Dans ces conditions les quantités moyennes d'azote mises annuellement à la disposition des plantes se situent entre 50 kg ha⁻¹ en zone de savane et 150 kg ha⁻¹ en zone forestière.

La dynamique de cette minéralisation étudiée au Senegal par Blondel (1971 b à d) montre qu'après une phase d'inactivité en saison sèche, les phénomènes microbiens sont stimulés par les premières pluies et se traduisent par des flux de minéralisation important atteignant sur un profil de 1 mètre respectivement 157 et 55 kg ha⁻¹ à Sefa et Bambey avec dans ce cas une variabilité inter-annuelle de 24 à 100 kg. Ces flux intervenant dans un délai de 3 à 6 semaines après le début des pluies sont susceptibles d'entraînement en profondeur et de ce fait plus ou moins bien utilisés par les plantes selon le calage du cycle cultural par rapport au cycle pluviométrique. Ainsi, une pluie de 20 mm est susceptible de diminuer de moitié le stock de 35 kg libéré dans les conditions de Bambey dans les 20 premiers centimètres du sol. Cette dynamique impliquant des semis précoces n'est cependant pas caractéristique de toutes les zones de savane (Wild, 1972b) et peut être plus progressive (Wild, 1972a).

Les apports météoriques: Nye (1961) au Ghana chiffre les apports par les eaux de pluie à 23,6 kg ha⁻¹ an⁻¹ dont 11 proviendraient du pluviolessivage de la végétation. En basse Côte d'Ivoire, Roose (1977) les estime à 23,7 kg ha⁻¹ an⁻¹. La variabilité observée semble dépendre de la proximité de la mer comme l'illustre le Tableau 1.

Tableau 1. Apports d'azote par les eaux de pluies

(1) d'après Thornton (1965); (2) d'après Jones & Bromfield (1970)

Distance de la mer (Km)	15	130	218	400
Apports kg ha ⁻¹ an ⁻¹	47,1 (1)	40,1 (1)	21,7 (1)	4 à 5 (2)

L'évaluation moyenne serait tant en zone tempérée qu'en zone tropicale de l'ordre de 10 kg ha⁻¹ an⁻¹ (Eriksson, 1952).

La fixation biologique: Cette fixation peut-être symbiotique ou non, mais quoi qu'il en soit, on dispose de peu de données quantitatives quant à son importance réelle au champ surtout en milieu traditionnel.

Aussi, en ce qui concerne les cultures de légumineuses est-il préférable d'estimer que la fixation par voie symbiotique de l'azote atmosphérique permet de satisfaire aux besoins de la culture sans modifier le stock d'azote du sol (Jones & Wild, 1975) bien que des variations importantes soient souvent observées mais le plus souvent en culture améliorée.

C'est ainsi qu'après culture d'arachide Jones (1974) note sur les céréales des augmentations de rendement équivalent à un apport de 30 kg ha⁻¹.

Les pertes liées à la culture

Les immobilisations et exportations par les plantes: La productivité des systèmes traditionnels est généralement faible et dépend essentiellement de la proximité du défrichement.

Les immobilisations moyennes annuelles par les cultures entrant en rotation varient de 20 à 40 kg ha⁻¹ (Tableau 2). Les exportations par les produits marchands représentent une quantité moyenne de 10 à 35 kg.

Tableau 2. Immobilisations et exportations moyennes en culture traditionnelle.

(1) d'après FAO 1970-1972 in "Memento d'Agronomie. Ministère de la Coopération - Paris 1974).

(2) Calculées d'après (1) et des données du Tableau 4.

Cultures	Rendements moyens en Afrique de l'Ouest (1) (kg ha ⁻¹) (1)	Immobilisations (kg ha ⁻¹) (2)	Exportations (kg ha ⁻¹) (2)
Riz	1030 (paddy)	25	13
Maïs	778 (grains)	22	12
Mil	659 (panicules)	26	12
Sorgho	806 (panicules)	28	13
Igname	9500 (30 % MS)	40	35
Manioc	7700 (30 % MS)	32	21
Banane pl.	8500 (30 % MS)	-	17
Arachide	720 (gousses)	34	25
Coton	683 (graine)	37	15

Tableau 3. Exportations par les produits marchands en Afrique de l'Ouest.
(1) d'après les données de FAO – 1971 (Production Yearbook Vol. 25)

	Exportations de N (kg ha ⁻¹) (produits marchands)	
	Totales	sans légumineuses
Dahomey	13	11
Ghana	13	12
Guinée	16	15
Côte d'Ivoire	13	12
Niger	10	9
Nigeria	18	15
Sénégal	21	13
Haute-Volta	12	11
Moyenne	14	12

Tableau 4. Teneur en azote (% de la matière sèche) de quelques cultures.

	Céréales		autres cultures	
	Grains	Pailles	Arachide:	
Riz	1,0 à 1,5	0,5 à 1,2	gousses	1,8 à 5,0
Maïs	1,6 à 1,9	0,6 à 1,0	fannes	0,8 à 2,0
Sogho	1,4 à 2,0	0,30 à 0,60	Igname	1,20 à 2,0
Mil	1,8 à 2,5	0,60 à 0,95	Manioc	0,48 à 0,55

Les estimations prenant en compte l'importance respective des différentes cultures dans les assolements (Tableau 3) sont inférieures et se situent entre 10 et 20 kg ha⁻¹ an⁻¹ ou 10 et 15 kg ha⁻¹ an⁻¹ selon que l'on prend en compte ou non les cultures de légumineuses.

Les évaluations de Nye & Greenland (1960) sont notablement supérieures et chiffrent les exportations à respectivement 35 et 23 kg ha⁻¹ an⁻¹ en zone forestière et en zone de savane. Toutefois, ces estimations restent délicates dans la mesure où la pratique des cultures associées est fréquente. Quoi qu'il en soit, ces quantités utilisées par les cultures, comparées à celles libérées à partir des réserves du sol, laissant supposer l'existence de pertes nettes non négligeables essentiellement en zone forestière.

Evolution du sol sous culture: La mise en culture qui supprime la source principale de matières organiques constituée par les restitutions issues de couvert végétal originel se traduit au niveau de l'azote par des pertes dans le sol variant de 25 à 78 kg ha⁻¹ an⁻¹ 3 à 4 ans après défrichage (Martin, 1970; Jones, 1971; Fauck *et al.*, 1969) dans les 15 premiers

centimètres. Elles peuvent être beaucoup plus importantes l'année suivant de défrichage et Fauck (1956) observe des pertes de 187 kg ha^{-1} à Sefa.

En moyennes ces pertes peuvent être estimées à 4 % par an. Elles sont le fait, d'une part de l'érosion et du ruissellement et d'autre part, de la lixiviation.

Les pertes en terre par érosion citées par Jones & Wild (1975) passant en revue les résultats concernant la zone de savane varient de 0 à $21 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ selon les techniques culturales et pour des pentes inférieures à 4 %. Les résultats moyens obtenus par Roose (1967) à Sefa sont de $9,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ils sont voisins de ceux cités par Kowal (1970) à Samaru. Selon cet auteur les pertes moyennes en azote attribuables à l'érosion sont de $6,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et de $7,4 \text{ kg}$ pour le ruissellement. En zone forestière, les pertes, compte-tenu des teneurs plus élevées en matière organique sont plus élevées. C'est ainsi que Roose (1973, 1977) sur pente de 7 % cite des pertes en terre de 32 t ha^{-1} se traduisant par une perte en azote de $98,3 \text{ kg ha}^{-1}$. Sous sol nu elles atteignent 259 kg ha^{-1} alors qu'elles ne sont que de $3,5 \text{ kg}$ sous forêt naturelle.

En ce qui concerne la lixiviation, faible sous cultures non fertilisées: de 2 à $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, elle peut atteindre 50 kg ha^{-1} sous sol nu (Vidal & Fauche, 1962) à Sefa.

La phase jachère

Outre la protection du sol, la jachère permet une fixation nette annuelle au niveau de la végétation de l'ordre de 95 kg ha^{-1} sous forêt et de 35 kg ha^{-1} en savane (Nye & Greenland, 1960). Selon ces auteurs, compte-tenu du traitement par brûlis de cette jachère, les gains moyens annuels au niveau du sol sont respectivement de 35 et $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Ils ont pour origine d'une part le recyclage en surface, par le biais des restitutions, d'éléments puisés en profondeur et d'autre part les fixations biologiques.

Le recyclage de l'azote provenant des formes fixées en profondeur N-NH_4 est invoqué par Jaiyebo (1967) sans toutefois être chiffré. Quant aux fixations biologiques, Balandreau & Villemain (1973) ont pu mesurer en savane de Côte d'Ivoire une fixation non symbiotique de l'ordre de $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. En ce qui concerne la fixation symbiotique, Dancette & Poulain (1969) mentionnent des accroissements de rendements équivalents à des apports de 20 kg ha^{-1} sous *Acacia albida*. Son importance en général dépend de la composition floristique de la végétation et plus particulièrement de la part des légumineuses. En culture pure de *Centrosema pubescens* Moore (1963) note des gains nets dans le système sol-plante variant de 112 à 224 kg ha^{-1} des grains analogues étant obtenus sous graminées (Moore, 1962).

Conclusion

Les termes du bilan azoté d'un système sol-plante en culture traditionnelle ont, exceptées les immobilisations et exportations, fait l'objet de peu de mesures en conditions réelles. Par ailleurs, beaucoup d'entre eux variant en fonction des conditions locales, il est difficile de donner des estimations moyennes.

On peut cependant noter que la productivité, bien que faible, de ces systèmes n'est entretenue que sous réserve d'un rapport temps de jachère/temps de culture assez élevé, variable selon les zones écologiques, mais supérieure à 3 en zone de savane et à 5 en zone forestière. Cette jachère permet de thésauriser les apports extérieurs: apports météoriques

et fixation biologique; tandis qu'en phase de culture prédominent les pertes par érosion et lixiviation.

Les systèmes améliorés

Dans ces systèmes, l'augmentation de la productivité relève de l'amélioration d'un ensemble de facteurs agissant plus ou moins directement sur le cycle de l'azote en particulier:

- choix de variétés répondant aux engrais et densités de semis;
- applications de techniques culturales aptes à assurer une bonne alimentation minérale du couvert végétal;
- calage correct du cycle cultural par rapport au cycle climatique;
- utilisation rationnelle des engrais (modalités des apports et nature).

En outre, l'introduction de la mécanisation peut permettre une meilleure restitution des résidus de culture et l'enfouissement de la matière verte produite par la sole de régénération quand elle existe.

Toutefois, l'interdépendance de ces facteurs fait que les rendements observés traduisent une série complexe d'inter-actions et ceci amène à considérer différents niveaux d'intensification selon que ces facteurs sont pris en compte globalement ou partiellement.

L'alimentation azotée des plantes

Elle est assurée d'une part par la minéralisation nette des réserves du sol et d'autre part par les apports d'engrais destinés à ajuster l'offre lors des périodes de forte demande.

L'élaboration d'un plan de fumure nécessite donc la connaissance des exigences des cultures compte-tenu des objectifs de production fixés. Il doit également être raisonné en fonction du système de culture pratiqué comportant ou non des légumineuses entrant en rotation et incluant ou non une sole de régénération, celle-ci pouvant être productive au cas où une prairie est substituée à la jachère classique.

Cycle interne de l'azote: Ce cycle réglé par l'activité microbiologique est étroitement dépendant des conditions pédoclimatiques et a pour support le stock de matières organiques du sol intervenant par la valeur de leur rapport C/N. C'est ainsi que les réponses aux engrais azotés sont faibles en zone forestière immédiatement après défriche tandis que l'azote est le premier facteur limitant en zone de savane (Djokoto & Stephens, 1961 a, b).

La résultante des processus de minéralisation et réorganisation fixe la disponibilité du sol en azote minéral. Selon Chabaliér (1976) travaillant sur des sols de Côte d'Ivoire où la minéralisation annuelle n'excède pas 120 kg ha^{-1} , on observe après des apports d'engrais de 100 kg ha^{-1} des pics de minéralisation équivalant à une fourniture de 300 kg d'azote . Par ailleurs, cet auteur par des études en laboratoire a pu préciser les paramètres cinétiques des transformations de l'azote dans le sol.

Les vitesses de minéralisation mesurées sont de l'ordre de 0,8 à 0,5 ppm par jour mais variables en fonction du pH dont la baisse se traduit par une action inhibitrice et de la nature des matières organiques incorporées au sol. C'est ainsi que des apports répétés de compost, bien qu'augmentant le coefficient de minéralisation de 3,7 à 5,4 % provoquent un ralentissement de la nitrification. Dans ces mêmes expériences, l'emploi d'engrais marqué a permis de montrer que le "turn over" de l'azote était très rapide: 25 % de l'azote

minéral apporté est réorganisé en 12 jours tandis que le taux de renouvellement est de 46 %.

Cette réorganisation peut affecter 30 à 70 % de l'engrais apporté et concerne principalement les formes labiles. Les résultats mentionnés par Blondel (1971b) illustrent également l'existence d'un cycle minéralisation - immobilisation. Les immobilisations affecteraient des quantités de l'ordre de 66 kg/ha représentant le tiers des apports. Toutefois la présence de plantes cultivées maintiendrait durant cette phase une certaine activité minéralisatrice variable selon les plantes qui interviendraient par leur activité rhizosphérique (Blondel, 1971e).

Ces possibilités de réorganisation temporaire d'une fraction des engrais constituent dans des sols où la lixiviation des nitrates est rapide, un facteur de conservation intéressant à considérer.

Les fixations biologiques: En ce qui concerne les capacités de fixation des légumineuses Agboola & Fayemi (1972) les estiment à respectivement 450, 350, 324 kg ha⁻¹ pour *Calopogonium mucunoides*, *Vigna sinensis* et *Phaseolus areus* cultivées en sol fertiles. Ces plantes seraient aptes à assurer leur propre alimentation azotée, et procureraient au sol des gains que Fauck (1956) a pu chiffrer à 250 kg ha⁻¹ pour une culture d'arachide. Toutefois, selon Jones & Wild (1975), ce chiffre est suspect. En effet, d'autres auteurs (Martin, 1970) constate une diminution du stock d'azote total après culture d'arachide. Cependant, sous culture fourragère de légumineuse (*Stylosanthes gracilis*), Hainnaux *et al.* (1978) chiffrent des gains nets dans le système sol-plante variant en moyenne de 50 à 150 kg ha⁻¹ an⁻¹ selon que ces plantes reçoivent ou non une fertilisation d'appoint autre qu'azotée.

Sous cultures de riz et de maïs Chabalier (1976) estime qu'il est peu vraisemblable qu'elles dépassent 30 unités.

Les apports d'engrais azotés: Ils sont très variables selon le niveau d'intensification. Les doses les plus fréquemment vulgarisées pour les cultures entrant en rotation dépassent rarement 25 à 50 kg ha⁻¹.

Ils visent essentiellement à l'optimisation économique du rapport outputs/inputs et ne sont pas toujours compatibles avec les nécessités agronomiques (Poulain, 1977). Dans les systèmes faiblement améliorés les apports sont par ailleurs préférentiellement réservés d'une part aux cultures de rente (coton) et ensuite aux céréales.

Toutefois, l'étude des courbes de réponse montre que sous réserve d'application d'un ensemble de techniques culturales adaptées et les autres facteurs limitant ayant été éliminés, les doses peuvent être notablement augmentées et se situer de 60 à 150 kg ha⁻¹ pour les céréales. Ils peuvent atteindre 750 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour les cultures fourragères mais restent faibles sous cultures de légumineuses. Toutefois, il est à noter que l'apport de hautes doses effectué le plus souvent sous forme de sulfate d'ammonium provoque des chutes notable du pH.

Ces apports destinés à compenser globalement les pertes dues à la culture doivent aussi permettre la satisfaction des besoins instantanés des plantes qui peuvent varier de 1,5 à 5 kg ha⁻¹ jour⁻¹ selon les plantes (Blondel, 1971f).

Le coefficient d'utilisation des engrais est plus élevés aux faibles doses que pour des apports élevés et varie de 33 à 25 % pour le riz de 60 à 35 % pour la maïs lorsque les apports passent respectivement de 60 à 120 unités et de 100 à 200 unités. Les taux pour des cultures fourragères n'excèdent pas 50 % (Hainnaux *et al.*, 1978) sont améliorés

par le fractionnement (Roose & Talineau, 1974). L'engrais non utilisé par la culture peut l'être par les cultures suivantes, les quantités ainsi mises en jeu sont de l'ordre de 20 % des apports (Chabaliér, 1976).

Les immobilisations

Elles sont fonction des apports et des niveaux de production qu'ils permettent comme le montrent les courbes de réponse, mais aussi des variétés plus ou moins bien adaptées. C'est ainsi que pour des apports moyens sur céréales Poulain (1967) indique que sur les variétés traditionnelles cultivées l'accroissement de production affecte plus les pailles (+124 %) que les grains (+33 %). Sur cotonnier, pour un rendement de 770 kg ha⁻¹ de coton-graine les résidues aériens représentent 69 % du poids total, ce taux n'est plus que de 48 % pour une production de 2150 kg ha⁻¹ (Deat & Sement, 1974).

Les types de sols et les caractéristiques climatiques induisent également une forte variabilité. Dupont de Dinechin (1967a) note sur sorgho des gains de rendement variant de 624 à 1131 kg ha⁻¹ selon les années, que les doses apportées soient faibles (22 kg ha⁻¹) ou fortes (100 kg ha⁻¹), les variations entre points d'essais s'échelonnant de 0 à 785 kg ha⁻¹.

Cette importante variabilité est illustrée dans les Tableaux 5 et 6. Les Tableaux 7 et 8 donnent des estimations moyennes de ces immobilisations et exportations pour différents niveaux de fertilisation azotée et en l'absence de tout autre facteur limitant. Les rendements correspondant aux fertilisations faibles à moyenne sont voisins des objectifs de production envisagés actuellement dans le cadre des opérations de développement mises en place. Ceux correspondant à la forte fertilisation sont relatifs aux résultats obtenus en stations expérimentales.

Compte-tenu des assolements et de la succession des cultures pratiquées, le Tableau 9 donne le niveau moyen des immobilisations et exportations selon que les restitutions sont totales ou partielles. En effet, dans la pratique agricole habituelle, les restitutions sont,

Tableau 5. Immobilisation d'azote par quelques cultures améliorées

Plante	Rendement (kg ha ⁻¹)	Azote immobilisé (kg ha ⁻¹)		Engrais (kg ha ⁻¹)
		dans la plante	dans le grain	
Mil P C 28 (Bambey) (1)	1930	79	31	75
Mil P C 11 (Bambey) (1)	2200	92	32	75
Mil local (Sefa) (1)	3130	132	45	50
Riz 63-83 (Sefa) (1)	3360	84	42	100
Sorgho 51-69 (Nioro) (1)	4060	134	72	100
Riz T (N) (Sefa) (1)	4240	74	50	100
Maïs Z M 10 (Sefa) 1967 (1)	4466	121	75	200
Maïs Z M 10 (Sefa) 1969 (1)	5440	138	98	200
Sorgho S 29 (Saria) (2)	2882	84	48	100
Maïs local (Farofo-Ba) (2)	3418	49	32	75
Maïs local (Farofo-Ba) (2)	3979	57	37	150

(1) : d'après Blondel (1971 b)

(2) : d'après Dupont de Dinechin (1967 a & b)

Tableau 6. Réponse à la fertilisation azotée de quelques cultures

Riz Senegal (Siband 1970)		Sorgho Haute-Volta (Chaminade 1970) Sols à concrétions		Maïs Haute-Volta (Dupont de Dinechin 1967 a & b)	
Apports (kg ha ⁻¹)	Rendements (kg ha ⁻¹)	Apports (kg ha ⁻¹)	Rendements (kg ha ⁻¹)	Apports (kg ha ⁻¹)	Rendements (kg ha ⁻¹)
0	2610	0	1150	0	716
37,5	4620	25	1460	25	1549
75	5420	50	1610	50	2656
112	5800	75	1740	75	3456
				150	3979

Côte d'Ivoire (Chaminade) +		Haute-Volta (Chaminade) + Sol gravelleux	
Apports (kg ha ⁻¹)	Rendements (kg ha ⁻¹)	Apports (kg ha ⁻¹)	Rendements (kg ha ⁻¹)
0	2300	0	420
20	2740	25	520
40	3080	50	710
80	3960	75	800

Tableau 7. Exportations en azote (kg ha⁻¹) par tonne de produits marchands

Culture	Exportation par les produits marchands (kg ha ⁻¹)	
Riz	12	(0 à 15)
Maïs	15	(10 à 19)
Sorgho	16	(14 à 22)
Mil	20	(18 à 25)
Arachide	50	(30 à 55)
Coton	28	(25 à 32)
Igname	4	(3 à 6)
Manioc	3	(2 à 4)

pour certaines cultures, faibles. Pour le manioc, les bois qui immobilisent environ 30 % de l'azote ne sont pas restitués et servent à la préparation des boutures. En ce qui concerne le coton, les tiges sont pour des raisons techniques (difficultés d'enfouissement) ou phytosanitaires, brûlées. Quant aux fanes d'arachide, elles servent dans de nombreuses régions à l'affouragement du bétail. De plus, cette culture ne reçoit en général qu'une faible fertilisation azotée.

Ainsi, dans la plupart des systèmes pratiqués, les restitutions proviennent essentiellement des pailles de céréales. Elles constituent comme l'ont noté de nombreux auteurs et en particulier (Poullain (1977) une pratique nécessaire à l'entretien de la fertilité.

La variabilité observée tient aussi d'une part à la possibilité d'effectuer un ou deux

Tableau 8. Immobilisations et exportations moyennes en fonction des niveaux de fertilisation

Niveau de fertilisation azotée (kg ha ⁻¹)	Rendements (kg ha ⁻¹)			Immobilisation par la plante (kg ha ⁻¹)			Exportation par les produits marchands (kg ha ⁻¹)		
	8 - 15	25 - 50	75 - 150	8 - 15	25 - 50	75 - 150	8 - 15	25 - 50	75 - 150
Riz	1300	2800	3500	40	70	85	20	34	45
Maïs	1500	3500	5000	45	80	115	25	52	75
Mil	1100	1700	2000	50	70	95	20	30	40
Sorgho	1300	2500	3000	45	75	90	20	38	45
Arachide	2200	—	—	130	—	—	88	—	—
Coton	900	1500	1900	70	90	100	25	42	55
Igname	15000	30000	—	75	140	—	70	110	—
Manioc	15000	30000	50000	80	150	200	50	90	130

Tableau 9. Immobilisations et exportations moyennes annuelles (kg ha⁻¹)

Apports kg/ha	Immobilisations (kg ha ⁻¹)	Exportations (kg ha ⁻¹)	
		Restitutions totales	Restitutions partielles
8 - 15	85 (60 à 105)	50 (25 - 65)	65 (40 - 90)
25 - 50	110 (85 à 130)	70 (40 - 85)	85 (60 - 105)
75 - 150	125 (95 à 150)	80 (60 - 105)	95 (75 - 115)

cycles culturaux par année et d'autre part à la proportion des céréales par rapport aux autres cultures, essentiellement les légumineuses et les plantes à tubercules. En ce qui concerne la balance (apports-exportations), il apparaît qu'elle ne devient positive que pour des apports élevés qui correspondent à l'efficacité moyenne la plus faible des engrais, et à condition de restituer le maximum de résidus de cultures.

Les bilans minéraux sous culture

Les pertes par lixiviation mesurées à Bambey en cases lysimétriques (Blondel, 1971a) varient en fonction de la dose et de la nature des apports (Tableau 11). Elles sont aussi fonction du couvert végétal comme l'illustrent les résultats de Tourte *et al.* (1964) selon lesquels elles passent de 45, 6 kg ha⁻¹ sous sol nu à 14, 9 kg ha⁻¹ sous culture d'arachide et à 4 kg sous jachère. Sous culture de céréales, elles se situent entre 40 et 45 kg ha⁻¹ pour des apports variant de 83 à 140 kg ha⁻¹.

Selon, Chabaliér (1976), seulement 1 à 5 % des pertes, sur un total variant de 30 à 70 % des apports, proviendraient directement des engrais, la reste résulterait de la minéralisation.

Jones (1975) par des études au champ sur maïs les estime à 25 % des apports en zone de savane. Sous cultures fourragères, graminéennes Hannaux *et al.* (1978) observent des pertes annuelles variant de 560 kg ha⁻¹ sous *Cynodon aethiopicus* à 170 kg ha⁻¹ sous *Panicum maximum* pour des apports de 750 kg ha⁻¹ an⁻¹. Le fractionnement de ces apports sous *Panicum* réduiraient ces pertes des 2/3 (Roose & Talineau, 1973). D'autre part, en culture bananière intensive, les pertes par ruissellement et drainage atteindraient 210 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour des apports de 380 kg (Roose & Godefroy, 1977; Godefroy *et al.*, 1975).

Quant aux pertes par dénitrification, Chabaliér (1976) a pu expérimentalement en préciser l'importance et les évalue entre 25 et 75 kg ha⁻¹. C'est ainsi que pour des cultures céréalières conduites avec restitution des pailles, il calcule pour le système sol-plante des bilans dont le déficit varie de 25 à 190 kg d'azote. Tourte *et al.* (1964) pour une succes-

Tableau 10. Balance entre gains et pertes en azote à Sefa, pour une succession de 5 cultures

Culture	Traitement des résidus	Apports kg/ha	Exportations kg/ha
Jachère	enfouis	40	0
Maïs	enfouis	120	95
Riz	exportés	69	86
Arachide	exportés	10	0
Mil	brûlés	69	120
Total		308	301
Pertes par lixiviation		—	150
Moyenne annuelle		61	90

Tableau 11. Bilan de l'azote en sol sableux au Sénégal. (Blondel 1971 a)

	N (NO ₃ ⁻)		N (NH ₄ ⁺)		
	300	600	300	600	0
Azote apporté (kg ha ⁻¹)	300	600	300	600	0
Azote mobilisé par la culture (kg ha ⁻¹)	110,6	294,9	220,0	262,8	9,4
Azote lixivé (kg ha ⁻¹)	64,9	108,6	9,9	17,9	3,9

sion jachère-arachide-céréale-arachide situent le déficit entre 48 et 96 kg ha⁻¹ an⁻¹ sans prendre en compte le rôle bénéfique éventuel de l'arachide. Si l'on suppose une auto-suffisance de cette culture, le déficit est ramené à 40 kg ha⁻¹ an⁻¹.

Charreau & Fauck (1970) ont calculé un déficit de l'ordre de 30 kg ha⁻¹ dans le cadre d'une rotation de cinq ans à Sefa (Tableau 10). Ces déficits le plus souvent constatés du bilan minéral expliquent les diminutions des réserves azotées du sol observées sous cultures continues (Fauck *et al.*, 1969; Jones, 1971; Siband, 1972).

Conclusion

Si la culture continue semble possible sous réserve d'une utilisation rationnelle des engrais et d'une restitution de l'ensemble des résidus de récolte, elle reste l'apanage des stations expérimentales où l'ensemble des techniques culturales peuvent être appliquées dans des conditions d'efficacité maximum. Les apports d'engrais minéraux tout en augmentant considérablement la productivité des systèmes sol-plante ne permettent pas, le plus souvent, du fait de l'importance des pertes par érosion, drainage et volatilisation, d'équilibrer le bilan en azote.

Aussi, tant qu'un seuil minimal de technicité n'aura pas été atteint, l'introduction d'une sole fourragère à base de légumineuses peut constituer une solution efficace à l'entretien d'un équilibre azoté satisfaisant au niveau des rotations culturales. De même, la restitution des résidus de culture constitue un impératif au maintien du bilan humique des systèmes intensifiés (Talineau *et al.*, 1976).

Conclusion générale

La mise en cultures puis leur intensification se traduit au niveau du cycle de l'azote par une ouverture de plus en plus importante. Si la productivité ne peut être en l'état actuel des connaissances améliorée et maintenue que par des apports d'engrais, ceux-ci ont pour conséquence une augmentation souvent importante des pertes.

Ainsi, même les apports à doses faibles ou moyennes, vulgarisées plus en fonction de critères "économiques" que de critères agronomiques restent insuffisants pour équilibrer le bilan azote. Ils risquent par ailleurs, du fait des effets cumulatifs, d'engendrer à terme des déséquilibres affectant des éléments autres que l'azote. Tourte (1971) ont illustré ces problèmes au Sénégal et montré qu'un bilan positif ne peut être obtenu que par l'intensification simultanée d'un ensemble de techniques culturales qui outre l'utilisation

des engrais à des doses moyennes à élevées comportent l'enfouissement d'une jachère et la restitution des résidus de culture.

Dans ces conditions, l'adaptation de l'ensemble des techniques culturales d'une part, et le choix judicieux des systèmes de culture d'autre part, constituent des éléments essentiels du contrôle de ce cycle.

Une autre voie possible d'amélioration semble être l'introduction dans les rotations, d'une sole fourragère productive constituée de légumineuses. D'autre part, étant donné l'accroissement notable des pertes d'engrais aux fortes doses d'apport, et compte tenu de la diminution de leur efficacité, l'amélioration génétique et la sélection de variétés aptes à utiliser par voie de fixation symbiotique ou non l'azote atmosphérique, constituent des voies à approfondir.

Enfin, il est nécessaire pour rationaliser la gestion du stock d'azote du sol de mieux connaître les mécanismes qui règlent le cycle interne de cet azote et leur déterminisme.

Quoi qu'il en soit, les données disponibles sont en l'état actuel des connaissances insuffisantes pour évaluer de façon exhaustive et fiable tous les termes du bilan azoté d'une succession culturale au champ. La détermination des valeurs moyennes à partir d'expérimentations particulières et adaptées à la mesure de chacun d'entre eux pris isolément élimine les interactions possibles et peut présenter un risque d'erreur important.

Bibliographie

- Agboola, A.A. & Fayemi, A.A. 1972. Fixation and excretion of N by tropical legumes. — *Agron. J.* 64: 409-412.
- Allan, W. 1965. *The African Husbandman*. London: Oliver and Boyd.
- Bernhard-Reversat, F. 1976. Essai de comparaison des cycles d'éléments minéraux dans les plantations de France et en forêt naturelle de Côte d'Ivoire. — *Bois et Forêts des tropiques* 167: 25-38.
- Balandreau, J. & Villemin, G. 1973. Fixation biologique de l'azote moléculaire en savane de Lanto (Côte d'Ivoire). Résultats préliminaires. *Rev. Ecol. Biol. Sol* 10: 25-33.
- Blondel, D. 1971a. Contribution à l'étude du lessivage de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal. — *Agron. Trop.* 26: 687-696.
- Blondel, D. 1971b. Contribution à l'étude de la dynamique de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal. — *Agron. Trop.* 26: 1303-1333.
- Blondel, D. 1971c. Contribution à l'étude de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Sefa. — *Agron. Trop.* 26: 1334-1353.
- Blondel, D. 1971c. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Nioro du Rip (Sénégal). — *Agron. Trop.* 26: 1354-1361.
- Blondel, D. 1971e. Rôle de la plante dans l'orientation de la dynamique de l'azote en sol sableux. — *Agron. Trop.* 26: 1362-1371.
- Blondel, D. 1971f. Rôle de la matière organique libre dans la minéralisation en sol sableux, relation avec l'alimentation azotée du mil. — *Agron. Trop.* 26: 1372-1377.
- Chabalié, P.F. 1976. Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote engrais dans un système sol-plante. Thèse, Faculté des Sciences, Université d'Abidjan no. 33.
- Chaminade, R. 1970. Travaux exécutés par l'IRAT en matière d'agronomie. — *Agron. Trop.* 25: 131-140.
- Charreau, C. & Fauck, R. 1970. Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Sefa. — *Agron. Trop.* 25: 151-191.
- Dancette, C. & Pouplain, J.F. 1969. Influence of *Acacia albida* on pedoclimatic factors and crop yields. — *Afr. Soils* 14: 143-184.

- Deat, M. & Sement, G. 1974. Atelier sur les résidus de récolte: le cotonnier. ORSTOM - Adiopodoume, 14 janvier, 1974. Document l'R'C'T', 12 pp.
- Djokoto, R.K. & Stephens, D. 1961a. Thirty long-term fertilizer experiments under continuous cropping in Ghana. I. Crop yields and response to fertilizers and manures. - *Emp. J. Expl. Agric.* 9: 181-195.
- Djokoto, R.K. & Stephens, D. 1961b. Thirty long-term fertilizer experiments under continuous cropping in Ghana. II. Soil studies in relation to the effects of fertilizers and manures on crop yields. - *Emp. J. Expl. Agric.* 29: 245-258.
- Dupont de Dinechin, B. 1967a. Contribution à l'étude des exportations du sorgho et du maïs en Haute Volta. - Colloque sur la fertilité des sols tropicaux-Tananarive, Vol. I. 528-543.
- Dupont de Dinechin, B. 1974b. Observation sur la priorité à accorder en vulgarisation à la fumure des céréales de culture sèche en Haute-Volta. - Colloque sur la fertilité des sols tropicaux-Tananarive, Vol. I: 1100-1108.
- Eriksson, E. 1952. Composition of atmospheric precipitations. I. Nitrogen compounds. - *Tellus* 4: 215-232.
- Fauck, R. 1956. Evolution des sols sous culture mécanisée dans les régions tropicales. - *Trans. 6th Cong. Soil Sci. E.*: 593-596.
- Fauck, R., Moureaux, C. & Thomann, Ch. 1969. Bilan de l'évolution des sols de Sefa après 15 années de culture continue. - *Agron. Trop.* 24: 263-301.
- Godefroy, J., Roose, E.J. & Muller, M. 1975. Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire. - *Fruits* 30(4): 223-235.
- Hainnaux, G., Talineau, J.C., Filloneau, C. & Bonzon, B. 1978. Economie de l'azote sous cultures fourragères en milieu tropical humide. - *Plant and Soil* 49: 477-489.
- Jaiyebo, E.O. 1967. Occurrence of non-exchangeable ammonium in soils. - *Niger. agric. J.* 4: 65-68.
- Jones, M.J. 1971. The maintenance of soil organic matter under continuous cultivation at Samaru, Nigeria. - *J. Agric. Sci. (Camb.)* 77: 473-482.
- Jones, M.J. 1973. The organic matter content of the savana soils of West Africa. - *J. Soil Sci.* 24: 42-53.
- Jones, M.J. 1974. Effects of previous crop on yield and nitrogen response of maize at Samaru. - *Expl. Agric.* 10: 273-279.
- Jones, M.J. 1975. Leaching of nitrate under maize at Samaru. - *Trop. Agric. Trin.* 52: 1-10.
- Jones, M.J. & Bromfield, A.R. 1970. Nitrogen in the rainfall at Samaru. - *Nature* 227: 86.
- Jones, M.J. & Wild, A. 1975. Soils of the West African Savana. Commonwealth Agricultural Bureau Technical communication No. 55.
- Kowal, J. 1970. The hydrology of a small catchment basin at Samaru. IV. Assessment of soil erosion under varied land management and vegetation cover. - *Niger. Agric. J.* 7: 143-147.
- Martin, G. 1970. Synthèse agropédologique des études ORSTOM dans la vallée du Niari. - *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 8: 63-79.
- Moore, A.W. 1962. The influence of legume on soil fertility under a grazed tropical pasture. - *Emp. J. Exper. Agric.* 30: 239-248.
- Moore, A.W. 1963. Nitrogen fixation in latosolic soil under grass. - *Plant and Soil* 19: 127-138.
- Nye, P.H. 1958. The relative importance of fallows and soils in storing nutrients in Ghana. - *J.W. Afr. Sci. Ass.* 4: 31-49.
- Nye, P.H. 1961. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. - *Plant and Soil* 13: 333-346.
- Nye, P.H. & Greenland, D.J. 1960. The Soil Under Shifting Cultivation. Commonwealth Agricultural Bureau Technical communication No. 51.
- Poulain, J.F. 1967. Etude de l'effet des éléments principaux d'une fumure annuelle à dose faible dans le cas d'une rotation quadriennale. - Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, Vol. I: 1076-1094.
- Poulain, J.F. 1977. Les résidus de culture dans les systèmes culturaux traditionnels de l'Afrique de l'ouest. Effets sur le bilan minéral et le statut organique des sols. Propositions pour une meilleure gestion. - FAO/SIDA Regional workshop in Africa on organic recycling in agriculture, 5-17 décembre, 1977. - Document IRAT/GERDAT, 52 pp.
- Roose, E.J. 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. - *Agron. Trop.* 22: 123-152.

- Roose, E.J. 1973. Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à la l'étude de l'érosion en milieu inter-tropical. — Thèse Fac. Sci. Univ. Abidjan No. 20.
- Roose, E.J. 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. — ORSTOM Travaux et Documents No. 78.
- Roose, E.J. & Godefroy, J. 1977. Pédogénèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schistes sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. — Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 15(4): 409-436.
- Roose, E.J. & Talineau, J.C. 1974. Influence de niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur un sol sableux de basse Cote d'Ivoire. — C.R. 10ème Coll. Inst. Inter. de la Potasse, Abidjan 1973, pp. 305-320. Bern: Institut International de la Potasse.
- Strand, P. 1970. Contribution à l'étude des relations sol-plante dans le cadre de l'opération Satec 1969 sur le riz pluvial en Casamance. — CNRA de Bambey, Document IRAT.
- Strand, P. 1972. Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute Casamance. Principaux résultats. — Agron. Trop. 27: 574-591.
- Thornton, I. 1965. Nutrient content of rainwater in Gambia. — Nature 205: 1025.
- Talineau, J.C., Hainnaux, G., Bonzon, B., Fillonneau, C. & Picard, D. 1976. Quelques conséquences agronomiques de l'introduction d'une sole fourragère dans une succession culturale de milieu tropical humide de Côte d'Ivoire. — Cah. ORSTOM, Sér. Biol. 11(4): 277-290.
- Tourte, R. 1971. Thèmes légers, thèmes lourds. Systèmes intensifs, voies différentes ouvertes ou développement agricole du Senegal. — Agron. Trop. 26: 632-671.
- Tourte, R., Vidal, P., Jacquinot, L., Fauche, J. & Nicon, R. 1964. Bilan d'une rotation quadriennale sur une sole de régénération au Sénégal. — Agron. Trop. 19: 1033-1072.
- Vidal, P. & Fauche, J. 1962. Quelques aspects de la dynamique des éléments minéraux d'un sol dior soumis à différentes jachères. — Agron. Trop. 17: 828-840.
- Wild, A. 1972a. Mineralisation of soil nitrogen at a savana site in Nigeria. — Expl. Agric. 8: 91-97.
- Wild, A. 1972b. Nitrate leaching under bare fallow at a site in northern Nigeria. — J. Soil Sci. 23: 315-324.



Hannover
10/12/87



Vegette = Nitrogen Cycling in
West African Ecosystems

T. Rosswall (Editor)



Proceedings of a workshop arranged by the SCOPE/UNEP International Nitrogen Unit in collaboration with MAB (Unesco) and IITA at the International Institute for Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria 11-15 December, 1978

A4
IBA

O.R.S.T.O.M. Fonds Document 12830

N° : 6539

Cote : B

Achaï