

Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur un sol sableux de basse Côte d'Ivoire

E. J. Roose et J.-C. Talineau, Maîtres de Recherche, Office de la Recherche Scientifique
et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Centre d'Adiopodoumé, Laboratoire de Pédologie
et d'Agronomie/Côte d'Ivoire

Résumé

Les auteurs présentent les résultats d'un essai d'orientation visant à établir des bilans hydriques et chimiques (engrais, pluie, érosion, lixiviation, exportation) sous deux plantes fourragères réagissant différemment à trois doses de fertilisation sur un sol ferrallitique sableux, profond, perméable et très désaturé en zone forestière tropicale humide.

En moyenne sur 3 ans, les pluies n'ont pas dépassé 1600 mm (500 mm de déficit par rapport à la normale), le ruissellement 1% et le drainage vertical 40% (634 mm).

Etant donnée l'importance de la production fourragère et des exportations minérales consécutives, la lixiviation a été réduite. Le phosphore est rapidement insolubilisé dans le sol; l'azote (pertes 2 à 35% des apports) et le potassium (1 à 6% des apports) sont immobilisés dans la récolte; seuls le calcium et le magnésium (40 à 75%) sont abondamment lixiviés. Même en condition de très fort drainage, il est donc possible de limiter les pertes d'éléments nutritifs par lixiviation en fractionnant et équilibrant les apports en fonction des besoins de la plante.

La pollution des eaux de drainage par l'usage intensif d'engrais N-P-K est donc un problème facile à résoudre. Par contre, l'acidification des sols sous culture intensive reste difficile à éviter puisque Ca et Mg sont fortement lixiviés même lorsque les besoins de la plante dépassent les apports.

Introduction

L'étude des interactions «sol-plantes fourragères», entreprise par le Laboratoire d'Agronomie de l'ORSTOM en Côte d'Ivoire dans le cadre du problème de la régénération du sol par une jachère cultivée a conduit à utiliser de fortes doses d'engrais minéraux. Exploité de manière intensive, *Panicum maximum* reçoit par exemple 750 kg/ha/an d'azote, 220 kg de phosphore, 620 kg de potassium, 400 kg de calcium et 120 kg de magnésium épandus après chacune des huit fauches.

Or, en milieu tropical humide, les précipitations sont particulièrement importantes et concentrées: Abidjan reçoit couramment 700 mm de pluie en quatre semaines, plus qu'à Paris en un an. Par ailleurs, les sols ferrallitiques sont généralement fort perméables et leur capacité d'échange de bases peu élevée (1 à 5 méq./100 g) puisque les argiles sont du type kaolinitique et leurs matières organiques rapidement minéralisées. Pour des précipitations de l'ordre de 2000 mm on peut observer un drainage de 40 à 60% en fonction de la couverture végétale.

C'est ainsi qu'un bilan effectué en collaboration par l'ORSTOM et l'IFAC dans sa bananeraie d'Azaguié (sol ferrallitique jaune, pluie=1800 mm+200 mm par irriga-

O. R. S. T. O. M. 305.

Collection de Référence

28 NOV. 1975

7898 Peds

tion) a montré qu'en trois ans on a perdu environ 70% du calcium et de la magnésie apportées en trois fois, 55% de l'azote et de la potasse fractionnées en 22 épandages et à peine 7,5% du phosphore apporté en deux doses.

Au vu de ces résultats, il est donc logique de s'interroger sur le devenir des engrais apportés à fortes doses sur les cultures fourragères. Cette note rapporte quelques résultats d'un essai d'orientation destiné à mesurer les principaux termes du bilan en éléments nutritifs majeurs sous *Panicum maximum* et *Stylosanthes guyanensis*.

1. Conditions expérimentales

1.1. Le milieu

Les essais sont menés au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (5° 20' N.; 4° 08' W.; 30 m alt.) à une vingtaine de kilomètres à l'ouest d'Abidjan. Le climat forestier guinéen (fig. 1), du type subéquatorial à deux saisons des pluies, est caractérisé par des précipitations annuelles de 2100 mm, des températures mensuelles variant peu ($\pm 2^\circ \text{C}$) autour de la moyenne annuelle (26° 2'), une humidité relative proche de 80% et une évapotranspiration potentielle de l'ordre de 1220 mm (Gosse et Eldin [1973]).

Le sol est un sol ferrallitique très désaturé, appauvri sur sables tertiaires colluvionnés. Le profil est homogène, sableux jusqu'à 120 cm, très perméable bien aéré mais acide et très pauvre chimiquement. La pente est faible (3%).

1.2. Le dispositif

Le protocole expérimental a déjà fait l'objet d'un précédent document (Roose et Talineau [1970]). Il convient de rappeler sommairement les données suivantes:

- deux espèces fourragères ont été retenues et cultivées sur des parcelles de 50 m²
 - une graminée, *Panicum maximum* clone G 23, implantée par éclats de souche à l'écartement 0,40 × 0,40 m,
 - une légumineuse, *Stylosanthes guyanensis*, semée en lignes espacées de 0,40 m;
- trois traitements fertilisation sont testés, chacun étant répété deux fois:
 - une dose 1 limitée à un apport initial permettant un démarrage correct de la végétation,
 - une dose 2 constituée par l'apport après chaque coupe de N = K₂O = 50 kg/ha,
 - une dose 3 où N = K₂O = 100 kg/ha.

Pour les deux dernières doses on a effectué un apport complémentaire de 65 kg de P₂O₅, 40 kg de chaux et 25 kg de magnésie.

La défoliation a lieu en moyenne huit à dix fois par an pour la graminée et quatre à six fois pour la légumineuse.

Pour établir le bilan hydrique on a mesuré:

- la pluie dans deux pluviomètres placés l'un à 150 cm de hauteur et l'autre au niveau du couvert,
- le ruissellement dans une case d'infiltration de 1,44 m² isolée de l'extérieur par une tôle fichée dans le sol et reliée à un réservoir par un tube,

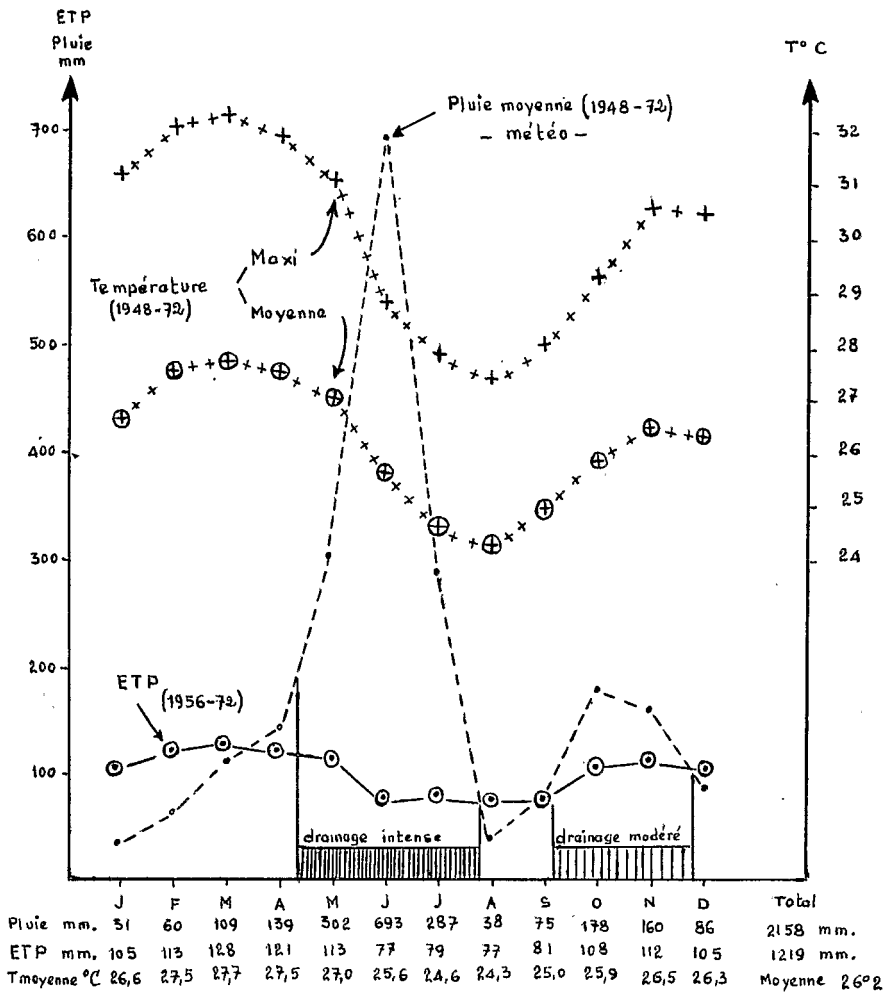


Fig. 1. Précipitations, température et ETP (Turc). Moyennes mensuelles à Adiopodoumé - d'après Gosse et Eldin (1973).

- le drainage vertical dans un lysimètre de sol non remanié de 63 cm de diamètre et 150 cm de profondeur (Roose et Tureauux [1970]),
- les variations du stock d'eau du sol par le relevé de profils hydriques au moyen d'un humidimètre à neutrons.

De plus, l'évapotranspiration potentielle est mesurée chaque jour à la station météo située à 200 m de ces parcelles.

Pour le bilan chimique on contrôle:

- les apports par les engrais et les pluies (filtration immédiate sur le terrain et conservation à l'ombre et au frais en laboratoire),
- les pertes par les eaux de ruissellement et surtout de drainage,
- les exportations par la récolte.

2. Les données de calcul du bilan

Les mesures des différents paramètres ont été effectuées d'avril 1970 à mars 1973.

2.1. Le bilan hydrique

2.1.1. *Les précipitations* s'élèvent à 1544 mm, 1714 mm et 1495 mm, soit, en moyenne, à 1584 mm/an: elles accusent donc un très fort déficit (500 mm) par rapport aux pluies moyennes annuelles de la région.

2.1.2. *Le ruissellement* est très faible: 2 à 20 mm par an, soit 0,1 à 1,3% des précipitations. Comme cela a été démontré en parcelles d'érosion (*Roose [1973]*), le ruissellement et l'érosion sous culture fourragère sont négligeables sur les sables tertiaires dès que la couverture végétale est complète et le sol protégé de l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Or, les essais ont été implantés à des périodes où les pluies ne sont pas agressives.

2.1.3. *Le drainage* représente 40% des pluies, soit 634 mm/an en moyenne. Sous *Panicum* on a recueilli 2% de drainage de plus que sous *Stylosanthes*. Les résultats sont aussi très voisins quelque soit le niveau de fertilisation. La majorité du drainage s'écoule en juin et juillet et à la suite de quelques grosses pluies en octobre et novembre. Durant les trois années d'observation un déficit de pluviosité d'environ 500 mm par rapport à la normale a été enregistré. Il intervient presque en totalité durant les six mois les plus humides de l'année (325 mm en mai-juin-juillet et 130 mm en septembre-octobre-novembre) à une période où le sol est voisin de sa capacité au champ et le couvert végétal pratiquement en régime d'évapotranspiration potentielle. En année normale on peut donc s'attendre à plus de 1000 mm de drainage.

2.1.4. *Les variations du stock d'eau du sol* n'entrent pas en ligne de compte puisque les bilans hydriques annuels commencent et finissent à des époques où les réserves hydriques du sol sont épuisées. Leur étude a été développée ailleurs (*Talineau et Roose [1973]*).

2.2. La production végétale

Mentionnée au tableau 1, la production de matière sèche en fonction des traitements s'élève de 9,6 à 26,6 t à l'hectare et par an pour *Panicum* et de 11,1 à 13,4 t à l'hectare et par an pour *Stylosanthes*.

On note l'effet très net du traitement fertilisation chez *Panicum* alors que *Stylosanthes* ne réagit que très faiblement aux apports d'engrais.

La baisse de production est générale au cours du temps, elle est d'autant plus marquée que les plantes ne reçoivent pas d'engrais et la chute est plus sévère chez *Stylosanthes* que chez *Panicum*.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par ailleurs (*Picard et al. [1973]*).

Tableau 1. Adiopodoumé: Production de matière sèche exprimée en kilogramme par mètre carré des deux espèces fourragères étudiées.

	Niveau de fertilisation	1 ^{re} année	2 ^e année	3 ^e année	Moyenne annuelle
<i>Panicum maximum</i>	1	1,312	0,721	0,846	0,960
	2	2,015	1,869	1,644	1,843
	3	2,905	2,759	2,326	2,663
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	1	1,558	1,136	0,624	1,106
	2	1,724	1,486	0,832	1,347
	3	1,595	1,457	0,934	1,329

3. Le bilan des éléments nutritifs majeurs (tableaux 2 à 7)

3.1. Apports par les engrais

Les quantités totales apportées au cours des trois années d'expérimentation figurent aux tableaux 2 à 7.

Le principe de la fertilisation repose sur l'égalité des apports en azote et en potasse. Pour ces deux éléments la dose 3 correspond approximativement aux exportations minérales consécutives aux fauches.

Les variations des apports entre les doses 1 et 3 sont de l'ordre de 1 à 20 pour l'azote et la potasse et de 1 à 10 pour P-Ca-Mg.

Stylosanthes exploité deux fois moins souvent que *Panicum* a reçu deux fois moins d'engrais.

3.2. Apports par les pluies

Pendant les trois années étudiées (déficitaires), les pluies ont apporté 21,2 kg/ha/an d'azote total (dont 30% de nitrate + ammoniacale), 30 kg de calcium, 7,1 kg de magnésium, 5,5 kg de potassium et 2,3 kg de phosphore.

Ces apports sont faibles mais pas négligeables dans le cadre d'une exploitation très extensive comme les cultures itinérantes traditionnelles ou les écosystèmes naturels (Bernhard-Reversat [1973]).

Signalons que les charges solubles les plus élevées sont observées lors des petites pluies et en fin de saison sèche (orage); leur richesse chimique dépendrait en effet pour une large part des poussières minérales et organiques (bactéries, algues, spores diverses, etc.) en suspension stable dans l'air.

3.3. Les pertes par érosion

Les déplacements de terre par érosion ont été trop réduits pour que leur analyse présente un intérêt.

Les pertes solubles dans les eaux de ruissellement se sont avérées négligeables également (tableaux 2 à 6) du fait des faibles volumes. En général, les teneurs observées sont du même ordre de grandeur que dans les eaux de drainage à part celles plus élevées de la potasse et surtout du phosphore, lequel circule sous forme liée aux particules solides.

3.4. Exportation, lixiviation et balance (tableaux 2 à 7)

3.4.1. L'azote

Il s'agit de l'azote total sans distinction des formes organiques et minérales.

Exportation

Dans le cas de *Panicum*, on note l'effet de la fertilisation sur les teneurs en azote des fourrages exportés (1 à 1,5%)* et une légère diminution de ces dernières au cours du temps. L'exportation d'azote de cette graminée est très élevée et directement fonction de la fertilisation.

Pour le *Stylosanthes* au contraire, la fertilisation n'a aucune influence et le taux d'azote moyen dans les tiges et les feuilles exportées reste élevé au cours du temps (2,4%). L'exportation d'azote par cette légumineuse est du même ordre de grandeur que celle de *Panicum* en raison de la richesse en azote de son fourrage.

Tableau 2. Comparaison des apports et des pertes en kg/ha/3 ans dans un système sol-plante fourragère en milieu tropical humide: Adiopodoumé 1970-1973. Cas de l'azote

	Niveau de fertilisation	Azote							Balance
		Apports			Pertes			Total	
		Pluie	Engrais	Total	Exp- tation	Lixi- viation	Ruissel- lement		
<i>Panicum maximum</i>	1	64	99	163	351	32	0,9	384	-221
	2	64	999	1063	642	25	0	667	+396
	3	64	2001	2065	1092	48	0,3	1140	+925
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	1	64	75	139	762	108	2,3	872	-733
	2	64	501	565	924	196	3,4	1123	-558
	3	64	951	1015	924	175	3,9	1103	-88

Lixiviation

Les volumes drainés étant voisins pour tous les traitements, les pertes par lixiviation sont proportionnelles aux teneurs en éléments solubles des eaux de drainage.

Sous *Panicum* les pertes par lixiviation varient de 25 à 48 kg/ha/3 ans et les teneurs augmentent à peine (1,5 à 2,5 ppm) lorsque les apports en azote varient de 1 à 20. On constate une légère baisse des teneurs au cours du temps (2,2 à 1,8 puis 1,6 ppm de 1970 à 1973).

Sous *Stylosanthes*, par contre, les pertes augmentent de 108 à 196 kg/ha/3 ans et les teneurs de 6,1 à 10 ppm lorsque les apports varient de 1 à 20. On observe une très forte augmentation des teneurs en azote au cours du temps (2,8 à 7,2 puis 21,6 ppm de 1970 à 1973), variation d'autant plus forte que les doses apportées sont élevées et les rendements décroissants.

* Les teneurs sont exprimées en pour-cent de la matière sèche à 105°C pour les exportations par la récolte et en ppm pour la lixiviation par les eaux de drainage. On réserve le terme de lessivage à l'entraînement des argiles et de certains colloïdes organiques et minéraux à l'intérieur du profil. Par lixiviation on entend donc l'entraînement des autres éléments chimiques (Aubert et Segalen [1966]).

Malgré des exportations d'azote du même ordre de grandeur et des apports sensiblement plus faibles (même dose mais moins de fauches), le *Stylosanthes* laisse s'échapper 3 à 8 fois plus d'azote que le *Panicum*. L'azote ne semble donc pas un facteur limitant pour la production de *Stylosanthes* dans les conditions de l'expérience mais bien pour le *Panicum*: les besoins instantanés (ou la capacité d'absorption et de stockage) seraient plus élevés sous *Panicum* que sous *Stylosanthes*, lequel, comme la plupart des légumineuses, peut fixer l'azote atmosphérique par activité microbienne symbiotique et éventuellement récupérer à grande profondeur grâce au pivot l'azote comptée comme lixiviée au-delà de 1,50 m dans cet essai.

Grâce à l'abondance des racines et des exportations, au fractionnement et aux dates d'épandage des engrais (en dehors des périodes de forte pluviosité) les pertes d'azote par drainage sont moins élevées que celles auxquelles on aurait pu s'attendre. Il faut cependant noter le fort déficit de pluviosité, une grande différence de comportement des deux types de plantes étudiées et une augmentation très significative des teneurs des eaux de drainage au cours du temps sous *Stylosanthes*.

Balance entre les apports et les pertes. (voir tableaux 2 et 7).

Dans le cas du *Panicum* sans engrais les exportations et les pertes sont 2,3 fois supérieures aux apports: le stock du sol a dû s'appauvrir de plus de 200 kg d'azote. Sous *Panicum* avec engrais la balance est positive et on ne retrouve pas dans le stock du sol (mesuré en août 1972) les 400 et 900 kg/ha apportés en excédent. On doit noter cependant qu'on ne connaît pas les pertes gazeuses ni les immobilisations à cette époque, de la litière (9 t produites en deux ans) des chaumes sur pieds et des racines. Pour le *Stylosanthes*, la balance est négative mais d'autant moins que les apports sont élevés. Il faut faire appel à des apports occultes de 730 et 560 kg/ha/3 ans qu'on ne retrouve pas dans le stock du sol. Sans doute faut-il faire intervenir la récupération en profondeur par l'enracinement pivotant, les immobilisations par la litière, les chaumes et les racines qui ne se retrouvent pas comptabilisées dans le stock du sol (terre fine tamisée à 2 mm) et surtout la fixation microbienne symbiotique de l'azote de l'air (légumineuse): l'azote fixé de cette façon par la légumineuse serait d'autant plus important que les autres apports sont réduits.

3.4.2. Le phosphore (tableaux 3 et 7)

Exportation

On ne constate que peu de différences entre les teneurs en phosphore des fourrages (0,3% de P en moyenne) en fonction des plantes étudiées ou des doses de fertilisation mais seulement une augmentation sensible des teneurs chez *Panicum* au cours de la seconde année. Le niveau des exportations (30 à 60 kg/ha/an) est plus lié au poids des récoltes qu'aux doses d'engrais apportées.

Lixiviation

Les pertes en phosphore par les eaux de drainage sont extrêmement réduites (1 à 1,5 kg/ha/3 ans de P) et les teneurs des eaux (0,17 à 0,25 ppm) varient très peu en fonction de la plante, du temps ou des doses d'engrais (croissance des apports de 1 à 9). Même si les apports dépassent largement les besoins des plantes, on ne constate pas de perte significative de phosphore car celui-ci ne reste pas longtemps soluble dans l'eau: il forme des complexes peu solubles avec la matière organique, le fer et l'alumine libre présentes dans ce type de sol (*Dabin [1963]; Boyer [1970]*).

Il n'est donc pas utile de fractionner les apports de phosphore en zone tropicale humide pour éviter les pertes par lixiviation; mais à cause de son insolubilisation rapide dans les sols riches en fer il est souvent nécessaire de maintenir le taux de phosphore assimilable par des apports annuels limités.

Balance

Sans apport d'engrais, la balance est négative: le sol s'appauvrit mais lentement car une fraction de P total devient assimilable.

Les apports d'engrais se sont soldés par une balance positive qui s'est traduite par une augmentation du stock du P assimilable du sol (ex. *Panicum* en 8/72: stock P ass. sur 40 cm = 320-730-860 kg/ha): cependant, le P total n'a guère évolué.

Tableau 3. Balance du phosphore (kg/ha/3 ans)

	Niveau de fertilisation	Apports			Pertes				Balance
		Pluie	Engrais	Total	Expor- tation	Lixi- viation	Ruissel- lement	Total	
<i>Panicum maximum</i>	1	7	60	67	87	1,2	0,3	89	- 22
	2	7	531	538	138	1,2	0	139	+ 399
	3	7	531	538	189	1,5	0	191	+ 348
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	1	7	30	37	108	1,3	0,7	110	- 73
	2	7	255	262	125	1,3	1,1	127	+ 135
	3	7	255	262	111	1,0	1,1	113	+ 149

3.4.3. Le potassium (tableaux 4 et 7)

Exportation

Les teneurs des fourrages en potassium sont très variables. Elles diminuent avec le temps. Fait plus important, elles sont très dépendantes du type de plante et les teneurs sont plus élevées pour *Panicum* (2,10%) que pour *Stylosanthes* (1,20%). La fertilisation conduit dans tous les cas à une augmentation des taux.

La quantité de potassium exportée est considérable dans le cas de la graminée. De façon encore plus nette que pour l'azote, le niveau est conditionné par la fertilisation. Pour la légumineuse, les exportations sont moindres et la réponse aux engrais moins linéaire.

Lixiviation

Sous *Panicum* les pertes par lixiviation (19 à 19,4 kg/ha/3 ans) et les teneurs en potassium des eaux de drainage (0,9 à 1 ppm) sont très faibles et constantes quelque soit le niveau de fertilisation (100 à 1700 kg/ha/3 ans).

Sous *Stylosanthes* les pertes par drainage (43 à 14 kg/ha/3 ans) et les teneurs dans les eaux (2,5 à 0,8 ppm) sont du même ordre de grandeur et diminuent régulièrement lorsque les apports passent de 1 à 20.

Les faibles teneurs en potassium observées dans les eaux de drainage restent semblables durant les trois années.

Ces pertes deviennent négligeables (1 à 6% des apports) dès que la plante est correctement alimentée en ce qui concerne les autres éléments essentiels. Cela laisse deviner l'importance de l'équilibre des éléments nutritifs apportés non seulement en fonction du stock du sol (*Jadin [1972]*) mais surtout des besoins de la plante.

Le potassium, cation monovalent, est considéré comme un élément mobile. S'il est si peu lixivié dans cet essai, c'est en raison de la très forte demande par les plantes, du fractionnement et du mode de répartition des engrais en dehors des périodes les plus humides ainsi que de la forte carence du sol en cet élément.

Balance

Elle ne devient positive que pour les doses d'apport les plus élevées dépassant 300 à 500 kg/ha/an. Car la demande des cultures fourragères en cet élément est très importante. L'analyse du sol ne montre pas de changement significatif du K total mais une chute du K échangeable. Sous *Panicum* par exemple le stock du sol sur 40 cm en août 1972 diminuait de 301 à 116 et 78 kg/ha pour les doses de fertilisation croissante. Il semble que sous l'effet de la demande par les plantes une partie du K total du sol évolue en K échangeable utilisée aussitôt par les plantes (*Hainnaux et al. [1973]*). Cependant, on peut se poser la question de l'origine du K total (stock 0-40 K total= 1200 à 1400 kg/ha) dans ce sol ferrallitique très désaturé composé exclusivement de kaolinite, goëthite, quartz et matières organiques.

Tableau 4. Balance du potassium (kg/ha/3 ans)

	Niveau de fertilisation	Apports			Pertes				Balance
		Pluie	Engrais	Total	Expor- tation	Lixi- viation	Ruissel- lement	Total	
<i>Panicum maximum</i>	1	17	84	101	478	19,0	0,8	498	-397
	2	17	851	868	1071	19,1	0,2	1090	-222
	3	17	1661	1678	1623	19,4	0,2	1643	+ 35
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	1	17	42	59	340	43,5	1,8	385	-326
	2	17	416	433	481	24,6	2,1	508	- 75
	3	17	830	847	598	14,0	4,7	617	+230

3.4.4. Le calcium (tableaux 5 et 7)

Exportation

Les teneurs en calcium sont dissemblables selon les plantes. Elles sont trois fois plus élevées chez la légumineuse (1,30%) que chez la graminée (0,40%); chez cette dernière, la fertilisation entraîne une légère élévation des teneurs.

Quantitativement *Stylosanthes* exporte de grosses quantités de calcium bien supérieures à celles constatées chez *Panicum* où le taux de récupération des engrais est particulièrement faible.

Lixiviation

Sous *Panicum* les pertes de calcium ont cru de 123 à 659 kg/ha/3 ans et les teneurs des eaux de drainage de 5,9 à 34,5 ppm de calcium pour des apports croissant de 1 à 9. Les teneurs augmentent rapidement au cours du temps sauf pour la dose la plus faible. Sous *Stylosanthes* les pertes sont encore plus élevées (182 à 438 kg/ha/3 ans) pour les

doses 1 et 2 mais plafonnent ensuite, les apports étant plus faibles (546 contre 1022 kg/ha/3 ans) que sous la graminée et les exportations plus élevées. Les teneurs croissent de 10 à 22 ppm avec les doses de fertilisation et augmentent rapidement avec le temps sauf pour la dose 1.

L'augmentation rapide (10 à 20 puis 54 ppm entre 1970 et 1972) des teneurs en calcium des eaux de drainage dans le cas de la dose 3, quelque soit la plante testée, montre que les apports de chaux dépassant largement les exportations par la plante ne sont pas retenus par le sol pourtant fortement désaturé. La lixiviation de 65 à 75% du calcium (cation bivalent) apporté en 6 à 8 fractions par an alors qu'on ne perd que 1 à 2% du potassium (cation monovalent) montre bien que, dans les conditions de l'expérience, à savoir les sols ferrallitiques désaturés de la zone tropicale humide, la place tenue par les besoins des plantes dans la détermination de la fertilisation l'emporte souvent sur celle du sol.

Cette lixiviation du calcium, importante malgré la forte production végétale et un fractionnement soigné en 5 à 8 apports par an, pose à moyen terme le problème des amendements, du maintien d'un pH favorable aux cultures et d'un équilibre Ca/K au sein des cations échangeables; en tous cas on ne peut plus envisager une fumure de fond de calcium dans les conditions climatiques tropicales humides.

Balance

La balance est généralement négative. Or, en août 1972, le stock de calcium du sol tant échangeable (425 à 640 kg/ha sur 40 cm) que total (980 à 1400 kg/ha) est nettement plus faible sous les parcelles recevant le moins d'engrais (dose 1). Il faut peut-être plus de temps et plus de répétitions pour que cela apparaisse à l'analyse du sol. La perte de 380 à 650 kg/ha de calcium sous *Stylosanthes* ne se traduit pas non plus par une diminution sensible du stock du sol (plus élevé que sous la graminée).

Tableau 5. Balance du calcium (kg/ha/3 ans)

	Niveau de fertilisation	Apports			Pertes				Balance
		Pluie	Engrais	Total	Exportation	Lixiviation	Ruissellement	Total	
<i>Panicum maximum</i>	1	90	69	159	144	123	1,7	269	-110
	2	90	672	762	205*	215*	0,2	420	+342*
	3	90	912	1002	392	659	0,5	1052	-50
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	1	90	54	144	379	182	3,6	565	-421
	2	90	336	426	631	438	4,1	1073	-647
	3	90	456	546	521	402	3,8	927	-381

* Le niveau des exportations et lixiviations est relativement plus faible que ce à quoi on pouvait s'attendre: problème d'équilibre cationique probablement.

3.4.5. Le magnésium (tableaux 6 et 7)

Exportation

Très comparable pour les deux espèces fourragères les teneurs en magnésium des tiges et feuilles sont relativement faibles (0,40%). Les effets des traitements ne sont guère décelables.

Les variations des quantités exportées s'expliquent par les différences de rendement en matière sèche. Les exportations sont pratiquement toujours supérieures aux apports.

Lixiviation

Sous *Panicum* les pertes en magnésium augmentent de 19 à 107 kg/ha/3 ans et les teneurs de 1 à 5,6 ppm lorsque les apports passent de 50 à 250 kg/ha/3 ans. A la dose 1 les teneurs évoluent peu d'une année à l'autre, mais à la plus forte dose d'apport (3) les teneurs augmentent rapidement (de 1,6 à 5,8 à 8,6 ppm de 1970 à 1972).

Sous *Stylosanthes* les pertes (29 à 81 kg/ha/3 ans) et les teneurs en magnésium (1,6 à 4,4) croissent aussi avec les apports (50 à 140 kg/ha/3 ans). Les teneurs augmentent en 1972 et particulièrement pour la dose 3 qui passe de 1,1 à 3,4 puis 12,3 ppm de 1970 à 1972.

Il apparaît donc que les pertes sont relativement plus élevées sous *Stylosanthes* (55 à 60%) que sous *Panicum* (20 à 43%). De même que sous bananeraie (*Godefroy, Muller et Roose [1970]*) les pertes par lixiviation en magnésium tout en étant très élevées le sont moins qu'en calcium car les apports sont plus faibles ($\pm 50\%$) et restent inférieurs aux exportations.

Balance

La balance entre les apports et les pertes est toujours négative (100 à 200 kg/ha/3 ans) ce qui a dû jouer comme facteur limitant à la production potentielle du *Panicum* (dose 3).

En août 1972, le stock de magnésium échangeable (60 à 115 kg/ha) du sol sur 40 cm tend à diminuer systématiquement lorsque les apports augmentent: les variations sont moins nettes pour le stock de magnésium total (830 à 1000 kg/ha/40 cm).

Tableau 6. Balance du magnésium (kg/ha/3 ans)

	Niveau de fertilisation	Apports			Pertes			Balance	
		Pluie	Engrais	Total	Exp- tation	Lixi- viation	Ruissel- lement		
<i>Panicum</i>	1	21	29	50	135	19,2	0,6	155	-105
<i>maximum</i>	2	21	232	253	216	43,7	0,2	260	-7
	3	21	232	253	327	107,6	0,2	435	-182
<i>Stylosanthes</i>	1	21	29	50	141	28,6	1,4	171	-121
<i>guyanensis</i>	2	21	116	137	180	76,0	1,5	258	-121
	3	21	116	137	159	80,7	2,0	242	-105

4. Discussion sur les pertes par lixiviation

4.1. L'importance des pertes par lixiviation dépend:

a) de la nature de la plante:

- de l'intensité de sa demande en chacun des éléments et son évolution au cours du cycle végétal et pluvial;
- de sa capacité d'interception par les racines puis de stockage et de redistribution des éléments à l'intérieur de chaque plant;
- du potentiel de production et d'exportation;
- de sa densité et de son enracinement.

Tableau 7. Exportation et lixiviation en fonction (%) des apports en éléments nutritifs majeurs.

- Adiopodoumé: fourrage d'avril 1970 à avril 1973.
 – Azaguié: bananeraie d'avril 1966 à fin 1968.

Adiopodoumé P moyen = 1600 Drain. moy. = 630 mm Ruiss. moy. = 20 mm	N			P			K			Ca			Mg		
	Apport		Export Lixiv.	Apport		Export Lixiv.	Apport		Export Lixiv.	Apport		Export Lixiv.	Apport		Export Lixiv.
	kg/ha/3 ans	%	%	kg/ha/ 3 ans	%	%	kg/ha/3 ans	%	%	kg/ha/ 3 ans	%	%	kg/ha/ 3 ans	%	%
<i>Panicum</i>															
dose 1	163	215	20	67	130	1,8	101	473	19	159	91	77	50	270	38
2	1063	60	2	538	26	0,2	868	123	2,2	762	27	28	253	85	17
3	2065	53	2	538	35	0,3	1678	97	1,2	1002	39	66	253	129	43
<i>Stylosanthes</i>															
dose 1	139	548	78	37	292	3,5	59	576	74	144	263	126	50	282	57
2	565	163	35	262	48	0,5	433	111	5,7	426	148	103	137	131	55
3	1015	91	17	262	42	0,4	847	71	1,7	546	95	74	137	116	60
Azaguié bananeraie															
Div. = 800 mm Ruis. = 140 mm	1290	14	55	49	–	7,5	1403	32	53	1000	1,4	77	561	2,7	61

Ainsi la lixiviation est plus élevée sous *Stylosanthes*, car ses besoins sont moindres que ceux du *Panicum*: cette légumineuse ne répond pas à la fertilisation proposée.

b) *des engrais*:

- leur quantité, leur équilibre en fonction des caractéristiques du sol et des besoins de la plante;
- leur nature (NO_3^- est plus facilement lixivié que NH_4^+ : *Blondel [1971]* et la nature des ions associés;
- leur mode de fractionnement en fonction des dangers de drainage.

c) *du climat*:

- de la hauteur des précipitations et surtout de leur répartition inégale qui augmente les chances que le stock d'eau du sol dépasse sa capacité au champ.

d) *du sol*:

- de sa capacité d'échange des cations et de son taux de saturation (donc teneur en colloïdes organiques et minéraux) (relativement peu important puisque malgré le sol désaturé on constate une forte perte de Ca + Mg);
- de sa capacité d'insolubilisation (phosphore) ou de rétrogradation (faible pour la kaolinite);
- de sa capacité d'immobilisation temporaire par la microfaune (*Blondel [1971]*) et de la vitesse du «turn over».

Il est donc possible de limiter les dangers de perte par lixiviation

- en plantant tôt et dense de façon à créer une forte demande de minéraux par la plante et de retarder le début du drainage par augmentation de l'ETR,
- en favorisant le développement d'un système racinaire dense et profond (labour et cultures associées),
- en choisissant des formes d'engrais peu mobiles et en les fractionnant et les équilibrant en fonction des besoins de la culture.

4.2. *Comparaison avec d'autres stations tropicales*

En région tropicale sèche (Bambey, P= 850 mm, Dv= 200 mm) sur sol ferrugineux tropical sableux (*Dior*), *Tourte et al. [1964]* et *Blondel [1971]* observent des pertes en azote minéral faibles sous culture annuelle (2 à 15 kg/ha/an) sans engrais et modestes (20%) en présence de fortes doses d'engrais (300 et 600 kg/ha/an de N). Ils soulignent le rôle de la végétation et de la microflore du sol pour limiter la lixiviation de l'azote. Les pertes sont aussi nettement plus faibles (10 à 18 kg/ha/an) si les apports d'azote sont du type ammoniacal plutôt que nitrique (65 à 108 kg/ha/an). Il faut noter cependant que la densité du mil avec engrais dans les lysimètres de sol reconstitué (40 cm de profondeur) était trente fois supérieure à celle qu'on observe couramment en plein champ!

En région tropicale humide (Azaguié, P= 1850 mm, Dv= 800 mm) sur sol ferrallitique très désaturé remanié, *Godefroy, Muller et Roose [1970]* ont constaté que sous bananiers fertilisés et irrigués les pertes en phosphore sont négligeables (voir tableau 7), mais les pertes en chaux et magnésie encore plus élevées (65 à 75% des apports) que les pertes en potasse et azote (55% des apports).

Les pertes sous bananiers sont donc importantes, parce que les exportations par les bananes sont inférieures à celles des fourrages et aussi à cause des apports très élevés nécessités par le mauvais fonctionnement de l'enracinement du bananier (problème de nématodes).

Les pertes par lixiviation sous culture fourragère à Adiopodoumé sont moins élevées qu'à Azaguié, à cause d'un déficit grave des précipitations et du drainage (± 500 mm), d'un fractionnement plus poussé de tous les éléments et surtout des exportations nettement plus importantes. Cependant, le sens des résultats est confirmé, à savoir, pertes très faibles de phosphore, mais lixiviation en Ca et Mg encore plus élevée qu'en N et K pourtant réputés mobiles et malgré un faible taux de saturation de la capacité d'échange du sol. Ils soulignent encore mieux qu'à Azaguié l'influence des exportations des plantes sur le niveau de lixiviation car tous les éléments sont également fractionnés.

4.3. Dangers d'acidification du sol

De nombreux auteurs (*Tourte et al. [1964]*, *Charreau et Fauck [1971]*, *Boyer [1970]*, etc.) ont signalé l'acidification des sols sous culture annuelle fertilisée. Or, il est reconnu que bon nombre de plantes cultivées ont une zone de pH optimale pour la production.

L'analyse des tableaux 5 à 7 montre que des apports de 330 kg/ha/an de Ca et 80 kg de Mg ne suffisent pas à rendre la balance positive. Par ailleurs, la lixiviation de Ca, Mg et SO_4^{--} (étudiée parallèlement dans cet essai) augmente rapidement (mais moins que proportionnellement) avec la dose des apports (même fractionnés) malgré la désaturation partielle du complexe absorbant du sol.

Nous pensons que les ions Ca^{++} + Mg^{++} sont chassés du complexe absorbant par l'acidité naturelle des engrais (nitrification de l'ammoniaque, sulfates) et par l'apport simultané de fortes doses de K^+ et NH_4^+ . Le calcium et le magnésium sont alors abondamment lixiviés. Par la suite, K^+ et NH_4^+ sont absorbés progressivement par les plantes et remplacés sur le complexe par H^+ ce qui s'accompagne d'une baisse de 0,5 à 1 unité pH en trois ans (*Talineau, Hainnaux et al. [1973]*).

En tous cas les problèmes des amendements calciques et magnésiens et du maintien du pH du sol en région tropicale humide ne sont pas simples. Il faudra étudier le rôle des anions accompagnant les éléments nutritifs des engrais et celui de l'accroissement des matières organiques du sol par l'incorporation dans la rotation de cultures à forte restitution sur l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol.

Conclusions

L'étude du bilan des éléments minéraux majeurs sous culture fourragère en milieu tropical humide aboutit aux résultats suivants :

- le phosphore, relativement peu exporté par les plantes, n'est pas lixivié mais rapidement insolubilisé dans le sol,
- l'azote et la potasse sont immobilisés par une forte augmentation des exportations par la récolte fourragère,
- le calcium et le magnésium par contre sont lixiviés de façon importante par les eaux de drainage,

- le comportement des plantes étudiées est sensiblement différent: le niveau de production du *Stylosanthes* est beaucoup moins lié aux apports que celui du *Panicum* et on constate sous légumineuse des pertes en N-, K-, Ca-, Mg beaucoup plus élevées.

De ces résultats on pourrait tirer quelques conclusions:

- 1° Dans les sols pauvres, perméables et soumis à un fort drainage, l'analyse des besoins des végétaux et des pertes par drainage semble une méthode sûre et rapide pour aborder les problèmes de fertilisation. En effet, la balance entre les apports et les pertes d'éléments nutritifs majeurs a fait apparaître, en fonction des traitements, des déficits et des excédents que ne reflète pas nettement le stock du sol au bout de 30 mois.
- 2° Seul le phosphore pourrait être appliqué en fumure de fond pluriannuelle; encore faut-il craindre qu'il ne devienne peu assimilable par les plants du fait d'une solide fixation par le fer et l'aluminium du sol. Quant au fractionnement des autres éléments nutritifs, bénéfique pour un certain nombre de plantes à croissance rapide, mais par contre sans intérêt économique dans le cas de l'hévéa et du palmier à huile, il nous semble que ces faits pourraient être interprétés de façon satisfaisante en tenant compte de l'importance du réseau racinaire des plantes, de ses besoins et de sa vitesse d'absorption, de stockage et de redistribution des éléments nutritifs majeurs. La comparaison du *Panicum* à enracinement puissant et croissance rapide et du *Stylosanthes*, légumineuse à enracinement pivotant et croissance lente mais soutenue en est un bon exemple.
- 3° Les modalités de lutte contre l'acidification des sols tropicaux sous culture intensive restent à mettre au point. En effet, le calcium et le magnésium se fixent difficilement tant sur la plante que sur le sol pourtant désaturé. Il serait intéressant à ce sujet de tester dans des essais de longue durée l'action d'engrais moins acidifiant et l'inclusion dans la rotation de cultures à fortes restitutions organiques.
- 4° Enfin, ces résultats permettent d'envisager avec optimisme le problème de la pollution des eaux souterraines par l'usage de doses massives d'engrais azotés puisqu'on peut réduire leur lixiviation en équilibrant les apports avec les exportations et les immobilisations par les plantes.

Bibliographie

1. Aubert G. et Segalen P.: Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 4 (4), 97-112 (1966).
2. Bernhard-Reversat F.: Le cycle du potassium en forêt tropicale humide. Comm. au 10^e Coll. de l'Inst. Intern. de la Potasse, Abidjan, décembre (1973).
3. Blondel D.: Contribution à l'étude du lessivage de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal. Agron. Trop. 26, (6-7), 687-696 (1971).
4. Boyer J.: Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone. Paris, ORSTOM, 175 p., multigr., tabl., fig., 526 réf., 1970.
5. Charreau C. et Fauck R.: Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa. Agron. Trop. 25 (2), 151-191 (1970).
6. Dabin B.: Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 1, 27-42, (1963).
7. Godefroy J., Muller M. et Roose E.J.: Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de basse Côte d'Ivoire. Fruits 25 (6), 403-423, 5 fig., 13 tabl., 11 réf. (1970).

8. *Gosse G. et Eldin M.*: Données agroclimatologiques recueillies à la station ORSTOM d'Adiopodoumé. 1948-1972. Rapport multigr., ORSTOM, Abidjan, 22 p., (1973).
9. *Hainnaux G., Talineau J.C., Fillonneau C., Bonzon B. et Picard D.*: Evolution du potassium sous culture fourragère en Centre Côte d'Ivoire. Comm. au X^e Coll. de l'Inst. Int. Potasse, Abidjan, décembre (1973).
10. *Jadin P.*: Etude de la fertilisation minérale des cacaoyers en Côte d'Ivoire à partir du diagnostic «Sob». Café, Cacao, Thé 16 (3), 204-218, 2 fig., 19 tabl. (1972).
11. *Picard D., Fillonneau C., Bonzon B., Hainnaux G., Sicot M. et Talineau J.C.*: Comportement de quelques plantes fourragères en Côte d'Ivoire en fonction de différents modes d'exploitation. Cah. ORSTOM, Sér. Biol. 19, 3-14, (1973).
12. *Roose E.J. et Henry des Tureaux P.*: Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. Agron. Trop. 25 (12), 1079-1087 (1970).
13. *Roose E.J. et Talineau J.C.*: Etude du bilan hydrique et de la lixiviation de quelques éléments chimiques sous cultures fourragères sur la station expérimentale du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Rapport ORSTOM, Abidjan, 24 p., multigr., (1970).
14. *Roose E.J.*: Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. - Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. ORSTOM, Adiopodoumé, 125 p., multigr., tabl., fig., bibliogr. (Thèse fac. des Sciences, Abidjan, 1973, n° 20).
15. *Talineau J.C. et Roose E.J.*: Réserve hydrique du sol et comparaison de son utilisation par une graminée et une légumineuse fourragère tropicale. ORSTOM, Abidjan, 19 p., multigr., 3 tabl., 7 fig., bibliogr. (Communication au Congrès de Vienne du 3 au 7 septembre 1973).
16. *Talineau J.C. et Hainnaux G.*: Evolution des propriétés physiques et chimiques du sol sous cultures fourragères. Résultats de la station de Bouaké. Rapport provisoire ORSTOM, Abidjan (sous presse), (1973).
17. *Tourte R., Vidal P., Jacquinot L., Faucher J. et Nicou R.*: Bilan d'un rotation quadriennale sur sols de régénération au Sénégal. Agron. Trop. 19 (12), 1033-1072 (1964).

Influence of fertilisation level on nutrient balance of two forage plants grown on a sandy soil of lower Ivory Coast

E.J. Roose and J.-C. Talineau, Maîtres de Recherche, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Centre d'Adiopodoumé, Laboratoire de Pédologie et d'Agronomie/ Ivory Coast

Summary

The authors give data from a triennial trial about water and nutrient balance (fertilisers, rainfall, runoff, leaching, exportation) under two fodder plants which react differently to three fertiliser doses on a deep, desaturated, permeable and sandy ferrallitic soil in humid tropical forest area. On an average, rainfall did not exceed 1600 mm (deficit of 500 mm on the normal average in this area), runoff 1% and vertical drainage 40% (634 mm).

Drainage and lixiviation were reduced because of fodder production and deficit rainfall. Phosphorus is quickly precipitated in the soil; nitrogen (losses of 2 to 35% of fertilisers) and potassium (1 to 6%) are fixed by exportation; only calcium and magnesium (40 to 75%) are strongly leached.

Thus, even under very hard drainage conditions, it is possible to limit leaching of nutrients in splitting and equilibrating fertilisers and needs of plants. Drainage water pollution by intensive use of N-P-K fertilisers is not a problem. However the soil acidification under intensive cultivation is not easy to avoid because calcium and magnesium are leached even if exportation exceed fertilisers.