

Charge en azote et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolessivage et de drainage dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire)

PAR

P. VILLECOURT * et E. ROOSE **

* Laboratoire de Zoologie de l'E.N.S., 46 rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05

Centre de Pédologie Biologique, B.P. 5, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

** Maître de Recherches en Pédologie à l'O.R.S.T.O.M., B.P. V 51, Abidjan (Côte-d'Ivoire)

INTRODUCTION

Le milieu tropical ivoirien a fait, durant ces dix dernières années, l'objet de nombreuses études effectuées par les biologistes et les spécialistes des sciences de la terre de l'O.R.S.T.O.M. et du C.N.R.S. Parmi d'autres, citons celles concernant les éléments nutritifs apportés par la pluie et ceux perdus par drainage, en milieu naturel ou cultivé.

La présente note rapporte les résultats de l'analyse d'une centaine d'échantillons d'eau de pluie et de drainage prélevés dans la savane préforestière de Lamto-Pacobo entre août 1970 et décembre 1971. Elle se rattache aux publications sur l'écologie de cette savane signées par l'équipe de chercheurs animée depuis 15 ans par le professeur LAMOTTE de l'École Normale Supérieure de Paris. En évaluant, pour chaque élément, les gains par la pluie et les pertes par drainage, c'est-à-dire deux postes des bilans « entrées-sorties », elle constitue une étape vers la connaissance des bilans complets de la savane et de leurs équilibres. La comparaison de la pluie et des pluviolessivats a été ajoutée, à cette occasion, comme objectif secondaire. L'azote est étudié plus longuement que les autres éléments.

Reçu le 25-11-76.

I. — MILIEU

Le bloc forestier ivoirien est entaillé au niveau du V baoulé par des savanes appartenant au groupe des savanes guinéennes préforestières. La savane de Lamto-Pacobo (5° 02' W, 6° 13' N, altitude entre 75 et 125 m) maintenant très étudiée (École Normale Supérieure, 1974) est une savane à palmiers-rôniers qui occupe la pointe du V et arrive ainsi à 110 km de l'océan.

La végétation forme deux types de paysages contrastés ; d'une part la forêt haute, dense, épaisse, au bord du Bandama ou sur les plateaux et d'autre part la savane avec son tapis d'herbe, ses rôniers, ses grands horizons et les étroites galeries des marigots qui la découpent en mosaïque.

Le climat est du type équatorial de transition. La température reste constamment élevée (moyenne annuelle 26° 7) et ne présente que de faibles variations saisonnières. Calculée sur 10 ans la pluviosité annuelle est proche de 1 280 mm répartie suivant un rythme à 4 phases comportant deux maximums en saison humide (juin et septembre-octobre), un minimum très marqué en saison sèche (janvier) et un affaissement en août. Selon les années la pluviosité et sa répartition se trouvent très modifiées.

Les sols, développés sur granite, sont surtout de type ferrugineux tropical, à horizons supérieurs sablo-gravillonnaires souvent remaniés, et appauvris.

II. — MÉTHODES

1. Prélèvements.

La pluviosité a été mesurée dans un pluviomètre standard type Association. Pour récolter le pluviollessivage sous forêt on a placé à terre 5 seaux en plastique (diamètre 26 cm) sous la galerie forestière du Bandama. Celle-ci est formée d'une strate arborée (*Cynometra megalophylla*, *Minusops kummel*, *Lonchocarpus sericeus*) et d'une strate arbustive (*Lasiodiscus mildbraedii*, *Pancovia bijuga*)*.

Sous savane, le pluviollessivat a été recueilli grâce à des gouttières en plastique de 2 m de long et 15 cm de large introduites sous les herbes de façon à être recouvertes le mieux possible. Deux emplacements furent choisis, correspondant à deux faciès très étudiés : une savane herbeuse à *Loudetia simplex* et une savane arbustive à Andropogonées (*Hyparrhenia diplandra*, *Hyparrhenia chrysargyrea*, *Andropogon schirensis*). Les observations ont été effectuées deux fois par jour. Le liquide recueilli a été mesuré puis filtré et utilisé pour préparer un échantillon moyen pondéré analysé à la fin du mois ; les récipients de capture étant constamment exposés, l'eau analysée contient la charge propre de la pluie et l'apport des poussières entre les précipitations.

Le drainage vertical a été étudié dans 3 lysimètres de petites dimensions (cylindres en chlorure de polyvinyle de 30 cm de diamètre et 80 cm de haut) mis en place en mai 1970 en haut d'une pente couverte d'une savane arbustive à *Hyparrhenia*. Un profil de sol ferrugineux tropical gravillonnaire y fut reconstitué (horizon gris en surface, virant au rouge vers 30 cm et gravillonnaire à partir de 70 cm) et des touffes d'Andropogonées voisines y furent plantées.

2. Analyses.

Pour éviter l'évolution de la composition azotée de l'eau pendant le stockage de plusieurs semaines précédant le dosage en série, les échantillons furent enfermés dans des flacons en plastique,

* Nous remercions J. L. DEVINEAU qui a fait ces déterminations.

abrités des fortes chaleurs et surtout de la lumière; de plus on les a additionnés d'un stabilisateur (parahydroxybenzoate de méthyle à 5 pour mille). N-NO₃ a été mesuré sur le terrain en utilisant la trousse Hach NI 10 à comparateur et gélules (réactif de Griess). Les autres analyses ont été effectuées au laboratoire central de l'O.R.S.T.O.M. à Adiopodoumé sous la direction de M. Gouzy que nous tenons à remercier vivement.

N total : réduction des nitrates par le mélange sulfophénique-zinc; minéralisation Kjeldahl; colorimétrie du bleu d'indophénol.

N-NH₃ : défécation en solution alcaline; colorimétrie du bleu d'indophénol.

Ca, Mg, K, Na : photométrie d'émission de flamme.

PO₄ : complexe phosphomolybdique; réduction; colorimétrie du bleu de molybdène.

Fe₂O₃ : réduction; O-phénantroline; colorimétrie.

Al₂O₃ : colorimétrie à l'ériochrome cyanine à pH 6,3.

SiO₂ : complexe silico-molybdique en milieu acide; réduction; colorimétrie.

Cl : thiocyanate mercurique; colorimétrie.

3. Expression des résultats.

Pour chacune des catégories d'eaux (pluie, pluviollessivats, drainage) et pour chaque élément, les données mensuelles de base mises en annexe ont permis de dégager les teneurs moyennes et extrêmes (tab. I) et les composantes — hauteur d'eau, teneurs et charges (hauteur d'eau × teneurs) — d'un bilan annuel (tab. II illustré par la fig. 3)

TABL. I

Teneurs moyennes pondérées (1971) et extrêmes (ppm) de la pluie, du pluviollessivat et du drainage

	Pluie			Pluvio. Forêt			Drain. vertical		
	m.p.	extr.		m.p.	extr.		m.p. (1)	extr. (2)	
N total.....	1,73	0,84	5,12	2,44	0,90	6,73	4,30	1,65	7,62
N-NH ₄	0,27	tr.	1,13	0,31	0,05	1,87	0,15	0,01	0,51
Ca.....	2,44	1,05	3,85	3,37	2,20	10,0	2,66	1,40	5,65
Mg.....	0,44	0,10	1,20	1,21	0,50	5,20	0,95	0,50	5,86
K.....	0,31	0,15	1,18	3,54	1,80	20,20	1,41	0,85	3,30
Na.....	1,00	0,35	2,50	1,23	0,43	3,29	2,04	1,15	2,85
PO ₄	0,99	0,15	2,50	2,51	1,65	6,10	1,95	1,15	3,85
Fe ₂ O ₃	0,05	tr.	0,25	0,17	0,01	0,58	0,25	0,10	0,53
Al ₂ O ₃	0,06	0,01	0,23	0,08	0,01	1,15	0,31	0,15	0,95
SiO ₂	0,30	tr.	4,6	0,43	0,01	3,0	15,4	3,8	21,0

(1) Drainage moyen des 3 lysimètres.

(2) Drainage des lysimètres.

Pour comparer le pluviollessivage et le drainage à la pluie, nous avons été amenés à établir les rapports

Pluviollessivage (PVF) Drainage (DR)

Pluie (PL) et PL des hauteurs d'eau, teneurs en charges (tab. IV). On

définit ainsi dans le cas du drainage : 1) le rapport des hauteurs d'eau ou taux de drainage t_d ; 2) pour

TABL. II

Bilans annuels concernant la pluie (PL), le pluviollessivat sous forêt (PVF) et le drainage annuel moyen (DR ann. moy.)

	PL 1971	PVF 1971	DR ann. moy.
Hauteur d'eau (mm).....	1 084	823,9	130
N total t.m.p. (ppm).....	1,73	2,44	4,3
N-NH ₄ t.m.p. (ppm).....	0,27	0,31	0,15
Ca t.m.p. (ppm).....	2,44	3,37	2,7
Mg t.m.p. (ppm).....	0,44	1,21	0,95
K t.m.p. (ppm).....	0,31	3,54	1,4
Na t.m.p. (ppm).....	1,00	1,23	2,0
Po ₄ t.m.p. (ppm).....	0,99	2,51	2,0
Fe ₂ O ₃ t.m.p. (ppm).....	0,05	0,17	0,25
Al ₂ O ₃ t.m.p. (ppm).....	0,06	0,08	0,31
SiO ₂ t.m.p. (ppm).....	0,30	0,43	15
N total charges (kg/ha).....	18,8	20,1	5,6
N-NH ₄ charges (kg/ha).....	2,9	2,6	0,2
Ca charges (kg/ha).....	26,5	27,8	3,5
Mg charges (kg/ha).....	4,8	9,9	1,2
K charges (kg/ha).....	3,4	29,1	1,3
Na charges (kg/ha).....	10,8	10,2	2,6
PO ₄ charges (kg/ha).....	10,7	20,7	2,6
Fe ₂ O ₃ charges (kg/ha).....	0,5	1,4	0,3
Al ₂ O ₃ charges (kg/ha).....	0,6	0,7	0,4
SiO ₂ charges (kg/ha).....	3,3	3,5	19,5

Les bilans PL et PVF sont mesurés. Les éléments (hauteur d'eau et teneurs) qui déterminent le bilan du DR ann. moy. sont estimés ; les teneurs utilisées sont les teneurs moyennes obtenues en 1971, cette approximation se justifiant en observant que dans l'annexe 3 les teneurs sont relativement indépendantes du volume drainé.

chaque élément i , deux coefficients d'enrichissement *, l'un pour les teneurs (e^i_d), l'autre pour les charges (E^i_d) ; on a $E^i_d = t_d \times e^i_d$ et E^i_d tend vers 1 lorsque e^i_d tend vers $\frac{1}{t_d}$. Dans le cas du pluviollessivage, on obtient par une démarche parallèle $E^i_{pv} = t_{pv} \times e^i_{pv}$.

III. — APPORTS DE N PAR LA PLUIE

1. Teneurs et charges de la pluie (annexe 1, Tab. I et II).

Pour une pluviosité de 1 084 mm l'apport annuel de N total est voisin de 19 kg/ha avec une teneur de 1,73 ppm calculée en rejetant deux mesures mensuelles aberrantes ; cet apport apparaît négligeable face aux besoins énormes

* Les coefficients d'enrichissement traduisent un enrichissement (ou un appauvrissement) lorsqu'ils sont supérieurs (ou inférieurs) à 1.

des cultures intensives modernes (100 à 700 kg/ha/an) mais il est important par rapport aux exigences bien plus faibles d'un écosystème naturel. L'apport de $N-NH_3$ est voisin de 3 kg/ha/an. Les mesures de $N-NO_3$ dans la pluie, incomplètes en 1970-1971, mais systématiques en 1972-1973, ont fait l'objet d'une publication distincte (VILLECOURT, 1975) citée dans le tab. III. En estimant à 0,15 ppm (moyenne 1972-1973) la teneur annuelle, on peut calculer un apport de 1,6 kg/ha/an de $N-NO_3$ par les 1 084 mm de 1971.

2. Discussion.

La revue d'ERIKSSON (1952) fait, avec des centaines de références, le tour de la bibliographie ; depuis cette date, on peut trouver au moins une trentaine de références dont on a extrait le tab. III, limité aux régions tropicales.

a. *N minéral.*

Dans la zone tempérée (Europe et États-Unis) les apports par la pluie se situent dans la majorité des cas entre 4,5 et 8 kg/ha/an ; certains chiffres dépassent 20 kg/ha à cause de la pollution industrielle. A Rothamsted entre 1888 et 1916, l'apport moyen est de 4,5 kg/ha/an pour une pluviosité de 750 mm ($N-NO_3$: 1,5 kg ; $N-NH_3$: 3 kg).

Dans la zone tropicale les apports de N minéral semblent, dans la majorité des cas, du même ordre de grandeur que dans la zone tempérée. Dans les résultats récents du tab. III l'apport se situe le plus souvent de 4 à 10 kg/ha/an (le résultat de JONES est contesté). L'apport de $N-NO_3$ est assez constant autour de 2 kg/ha/an et il est inférieur à l'apport de $N-NH_3$.

b. *N organique.*

La différence de teneur entre N total et N minéral ($N-NH_3 + N-NO_3$) peut être considérée comme N organique. A Lamto, zone tropicale vierge de toute pollution industrielle ou agricole, cette forme organique représente 14 kg/ha/an soit 75 % de N total apporté par les pluies. Dans une zone non polluée proche d'Abidjan ROOSE a calculé que les apports de N total s'élèvent à 28,1 kg/ha/an, dont 70 % de N organique (moyenne sur 3 années) pour des précipitations de 2 100 mm.

Cette forme organique de N a été très peu recherchée jusqu'ici dans la pluie, les auteurs se limitant à N minéral. Pour la zone tempérée, la seule étudiée à notre connaissance, on ne trouve que 3 références dans ERIKSSON (1952) ; en utilisant aussi une dizaine d'autres références récentes on calcule une moyenne de 3,6 kg/ha/an entre des extrêmes de 1,3 et de 9,5 kg/ha/an. L'apport de N organique en Côte d'Ivoire semble donc très important et très supérieur à celui observé en zone tempérée et la question mériterait d'être reprise et expliquée.

3. Origine et variations saisonnières.

Pour les 3 formes d'azote les teneurs mensuelles sont élevées au début de la saison des pluies (février à avril) et baissent en pleine saison (juin) [N total : 2,7 — 0,84 ppm ; $N-NH_3$: 0,70 — 0,02 ppm ; $N-NO_3$: 0,35 — 0,02 ppm]. Ceci s'explique en considérant l'origine de N contenu dans les eaux de pluie. N minéral proviendrait des embruns marins (opinion actuellement combat-

Apports d'azote par la pluie

Référence	Situation	Période	Précipitation mm
Vialard-Goudou et Richard (1956)	Indochine	1952	2 137
		1953	2 234
		1954	2 428
Meyer et Pampfer (1959)	Bassin du Congo	1958-1959	1 546
Jones (1960)	Nigéria du Nord	1959	1 067
Nye (1961)	Ghana	1959	1 847
Wetselaar et Hutton (1963)	Australie (14° S)	1958-1959	900 ?
Richard (1964)	Addis-Abeba		1 333
Lemoalle (1972)	Fort Lamy		656
Roose (verbalement)	Côte d'Ivoire (Abidjan)	1970-1972	2 100
Villecourt (1975)	Côte d'Ivoire (Lamto)	1972	1 324
		1973	1 217
Villecourt et Roose (cet article)	Côte d'Ivoire (Lamto)	1971	1 084

tue), de divers processus électriques, chimiques ou photochimiques de transformation de N libre de l'atmosphère, de la volatilisation de N-NH₃ du sol et de la pollution industrielle. N organique provient des poussières telluriques en suspension stable dans l'atmosphère et de la microflore qui l'accompagne. Disséminé par le vent, N est ramené au sol par la pluie.

L'influence saisonnière sur les apports de N s'explique en remarquant que les différentes sources alimentant la charge atmosphérique s'ajoutent en fin de saison sèche. En effet, les feux de brousse ont dénudé le sol qui, soumis à l'énergie solaire, dégage de l'ammoniac. Les orages sont nombreux (mais l'influence des éclairs sur la teneur en N-NO₃ des pluies n'est plus considérée par les auteurs récents comme importante). Les tornades fréquentes et les vents secs venant du Nord (harmattan) soufflant sur le sol dénudé chargent fortement l'atmosphère en poussières. Enfin, les feux de brousse parcourent chaque année la savane en saison sèche : à cette occasion environ 10 kg/ha de N provenant des protéines végétales ne se retrouvent pas dans les cendres (annexe 6) et alimentent la charge atmosphérique (CÉSAR, SCHMIDT et VILLECOURT, à paraître). On comprend dès lors que les premières pluies qui lavent l'atmosphère soient particulièrement chargées.

IV. — PERTES DE N PAR DRAINAGE

1. Volume drainé.

Il a été observé dans 3 lysimètres depuis leur installation en juin 1970 jusqu'en juin 1972. Si l'on exclut les périodes où le drainage est provoqué par arrosage, on constate (Fig. 1 et annexe 3) qu'il est concentré en quelques mois par an coïncidant avec les périodes où les précipitations dépassent l'ETP : septembre 1970, mai-juin 1971 et de mars à juin 1972.

III

dans les régions tropicales

N-NH ₃ ppm	N-NO ₃ ppm	N total ppm	N-NH ₃ kg/ha	N-NO ₃ kg/ha	N minéral kg/ha	N total kg/ha	$\frac{\text{N organique}}{\text{N total}}$
0,37	0,11		7,9	2,2	10,3		
0,22	0,093		4,9	2,1	7,2		
0,50	0,13		12,1	3,2	15,5		
			3,2	2,2	5,4		
5,0			53,3		54,6		
			11,5	2,5	14		
			0,8	0,7	1,5		
0,55	0,16		7,3	2,1	9,4		
0,53	0,18		3,5	1,2	4,7		
0,18	0,22	1,34	3,8	4,6	8,4	28,1	0,70
	0,18			2,4			
	0,12			1,4			
0,26	0,15	1,68	2,85	1,6	4,45	18,2	0,76

En 1971, on a observé un drainage de 55 mm pour des précipitations de 1 089 mm. En 1972, le drainage s'élève à 212 mm pour 1 324 mm de pluie (Fig. 2). Étant donné la grande variabilité du drainage annuel on a été amené à estimer le drainage annuel moyen sur 10 ans (1962-1971) à partir de la hauteur mensuelle

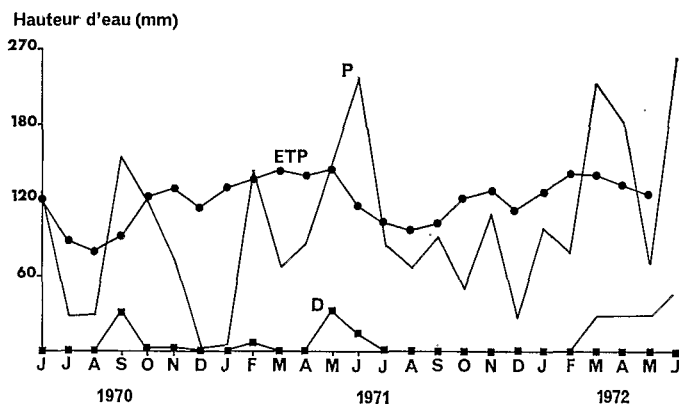


FIG. 1. — Hauteurs d'eau mensuelles du drainage moyen des trois lysimètres D, de la pluie P et de l'évapotranspiration potentielle ETP. L'ETP a été calculée selon TURC (1961). Le drainage provoqué par arrosage (1971 — mars et septembre —) a été écarté.

des précipitations et de l'ETP (annexe 2). En soustrayant mois par mois l'ETP des précipitations, on trouve une valeur approchée du drainage qui doit être corrigée de la hauteur de pluie nécessaire pour ramener le sol à la capacité au champ au début de la saison des pluies, soit environ 100 mm.

Ainsi estimée, la hauteur annuelle du drainage varie de 0 à 500 mm par an

autour d'une moyenne de l'ordre de 130 mm. Cette valeur est voisine de celle obtenue par ROOSE (1972) à Bouaké (150 mm) mais très inférieure à celles observées dans la région d'Abidjan (600 à 1 200 mm de drainage pour 2 100 mm de pluie).

2. Teneurs et charges du drainage (annexe 3, Tab. I et II).

La teneur en N-NO₃ du drainage ne figure pas dans le tabl. II avec les teneurs des autres éléments connues grâce aux lysimètres ; en effet il a paru préférable de ne pas tenir compte pour N-NO₃ des résultats obtenus par cette voie (deux lysimètres ne fournissant pas de nitrate, contrairement au troisième) mais de se fonder sur une dizaine de mesures faites par extraction à l'eau d'échantillons pris à différentes saisons dans l'horizon A₁. En l'absence constante de N-NO₃ dans ces recherches, la teneur en N-NO₃ du drainage a été estimée à un niveau très bas (0,05 ppm) correspondant à une charge de 0,07 kg/ha. Les pertes de N total par drainage s'élèvent donc à 5,6 kg/ha/an dont 95 % se trouvent sous forme organique ; le reste, minime, est ammoniacal (0,2 kg) avec des traces d'azote nitrique (0,07 kg).

3. Discussion sur N minéral dans le drainage.

Les faibles teneurs en N minéral des sols de savane confirment les résultats de de RHAM (1973) qui constate la pauvreté en N minéral (< 2 ppm) et la faible capacité de production (moins de 2 kg/ha en 1963) d'azote minéral des sols de la savane de Lamto ; dans les sols de forêt au contraire, teneurs et capacité de production sont bien plus élevées. A la suite de ces résultats, VILLECOURT compare au laboratoire (40 échantillons) le pouvoir nitrifiant des sols de la savane et de la forêt (quantité de N-NO₃ produite par le sol dans les 24 heures qui suivent un apport de 200 ppm de N-NH₄) ; il est toujours nul dans les savanes (14 essais) et au contraire toujours élevé en forêt où il atteint 140 ppm dans le cas le plus favorable.

Cette absence de nitrification dans les sols de savane attribuée par certains à un effet inhibiteur des graminées (de RHAM, 1973) ne paraît être que la conséquence de l'absence de N-NH₄. En effet dans une expérience complémentaire, faite sur un lysimètre installé en savane, dont le sol a une couverture d'Andropogonées, une nitrification intense et durable a pu être déclenchée par apport de N-NH₄. Ce lysimètre reçoit, en août 1971, 29,4 mg/cm² de N-NH₄ (2 940 kg/ha) par arrosage réparti sur 13 jours avec un volume correspondant à 260 mm, d'une solution où la concentration de N-NH₄ est le 1,1 pour mille ; les eaux de drainage qui s'écoulent à partir de ce moment sous l'effet de la pluie sont recueillies régulièrement et analysées pour déterminer les teneurs en N minéral. La figure 2 illustre les résultats qui ont été exprimés à partir de bilans périodiques pouvant porter sur plusieurs mois ; on a admis qu'à l'intérieur de ces périodes les teneurs et hauteurs d'eau du drainage mensuel étaient constantes. Le volume du drainage mensuel s'annule pendant la saison sèche 1971, devient maximum en juin 1972 et s'annule à nouveau à partir de juillet 1972 jusqu'à la fin de l'année ; la teneur en N-NO₃ du drainage est nulle jusqu'au 14^e jour qui suit l'apport massif de N-NH₄, puis elle augmente progressivement et dépasse 400 ppm pendant la saison des pluies 1972 ; la charge en N-NO₃ du drainage atteint aussi à ce moment un niveau très élevé (3 mg/cm² équivalents à 300 kg/ha).

V. — APPORTS ET PERTES DES ÉLÉMENTS MAJEURS AUTRES QUE N (annexes 1 et 3, Tab. I et II)

Comme l'indique le tableau II, l'apport (kg/ha/an) par la pluie est important pour 3 éléments : Ca (26), Na et PO_4 (11) ; il est de l'ordre de 3 pour les autres éléments, sauf pour Fe_2O_3 et Al_2O_3 présents à l'état de traces. Les pertes par drainage (kg/ha/an) sont plus uniformes, variant de 2 (K) à 3,5 (Ca) sauf pour Fe_2O_3 et Al_2O_3 (pertes très faibles) et pour SiO_2 préférentiellement évacuée (19,5).

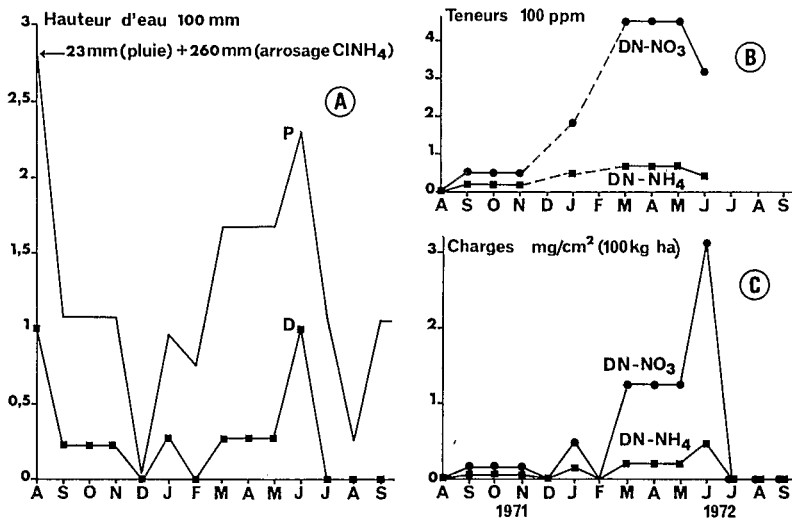


Fig. 2. — Hauteurs d'eau de la pluie P, du drainage D (courbes A) ; teneurs (courbes B) et charges (courbes C) en N minéral des eaux de drainage après apport de N-NH_4 .

VI. — COMPARAISON PLUIE-DRAINAGE

Le tableau IV dont la présentation a été faite plus haut (voir II.3.) permet la comparaison pluie-drainage ; le taux de drainage t_d est de 0,12. Pour tous les éléments, sauf SiO_2 , le coefficient des teneurs e_d^i se situe très au-dessous de la valeur 8 correspondant à un coefficient des charges $E_d^i = 1$; il y a appauvrissement du drainage par rapport à la pluie — E_d^i situé suivant l'élément d'environ 0,1 (N-NH_4 , Ca) à 0,6 (Fe_2O_3 , Al_2O_3) —. Dans le tableau VI la différence des charges (pluie — drainage) qui représente le gain de l'écosystème est (kg/ha/an) importante pour N total (13), Ca (23), Na (8), PO_4 (8). Contrairement aux autres éléments, SiO_2 est préférentiellement exporté par le drainage ($e_d^{\text{SiO}_2} = 50$; $E_d^{\text{SiO}_2} = 6$; perte de 16 kg/ha/an). La figure 3 illustre, pour quelques éléments, la comparaison pluie-drainage.

TABL. IV

Pluiolessivage sous forêt 1971 (PVF)
et drainage annuel moyen (DR) rapportés à la pluie 1971 (PL)

Hauteur d'eau	$\frac{PVF}{PL}$		$\frac{DR}{PL}$	
	$0,76 = \frac{1}{1,32} = t_{pv}$		$0,12 = \frac{1}{8,3} = t_d$	
	Teneurs (e_{pv}^i)	Charges (E_{pv}^i)	Teneurs (e_d^i)	Charges (E_d^i)
N total.....	1,4	1,1	2,5	0,30
N-NH ₄	1,1	0,87	0,55	0,07
N-NO ₃	2*	1,6*	0,33	0,04
Ca.....	1,4	1,0	1,1	0,13
Mg.....	2,7	2,1	2,2	0,26
K.....	11	8,6	4,5	0,54
Na.....	1,2	0,93	2,0	0,24
PO ₄	2,5	1,9	2,0	0,24
Fe ₂ O ₃	3,4	2,6	5,0	0,63
Al ₂ O ₃	1,3	1,0	5,2	0,62
SiO ₂	1,4	1,1	50	6,0

* Extrapolation à partir de résultats saisonniers.

La présentation et l'utilisation du tableau sont commentées dans le texte (voir II, 3).

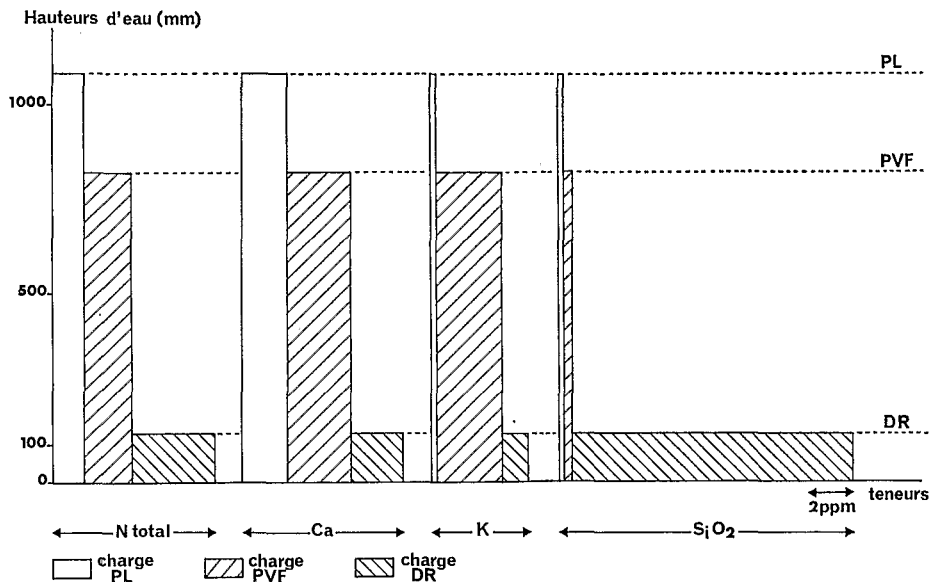


FIG. 3. — Bilans annuels (hauteurs d'eau, teneurs et charges) se rapportant à N total, Ca, K, SiO₂, de la pluie PL, du pluiolessivat sous forêt PVF et du drainage annuel moyen DR.

VII. — COMPARAISON PLUIE-PLUVIOLESSIVATS

1. Pluiolessivat de forêt (annexe 4, Tab. I et II).

Le tab. IV (présenté en II.3.) permet la comparaison pluie-pluiolessivat ; le taux de pluiolessivage t_{pv} est de 0,76 soit $\frac{1}{1,3}$. Pour plusieurs éléments

(N total, N-NH₄, Ca, Na, Al₂O₃, SiO₂), le coefficient d'enrichissement des teneurs e_{pv}^i est voisin de 1,3 entraînant un coefficient d'enrichissement des charges voisin de 1. Pour les autres éléments (N-NO₃, Mg, Fe₂O₃) e_{pv}^i s'élève vers 2-3 entraînant un enrichissement E_{pv}^i voisin de 2. Pour K les enrichissements sont singulièrement importants ($e_{pv}^K = 11$; $E_{pv}^K = 8,6$) traduisant la mobilité bien connue du potassium foliaire (VEDY, 1973).

Par ailleurs dans le tableau II l'apport net (kg/ha/an) par le pluiolessivage (PVF — PL) est négligeable (compris entre 0 et 1) pour N total, N-NH₄, Na, Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂. Par contre il est très important pour Mg (5,1) PO₄ (10) et surtout K (26). La figure 3 illustre, pour quelques éléments, la comparaison pluie-pluiolessivats.

2. Pluiolessivats de savanes.

Pendant 4 mois les pluiolessivats sous 2 savanes (*Loudetia* et *Hyparrhenia*) ont été analysés (annexe 5). Le tab. V compare à la pluie les eaux de pluiolessivage pendant l'ensemble de cette courte période ; seuls y figurent les éléments avec lesquels les coefficients d'enrichissement sont d'interprétation indiscutable ; on retrouve sous savanes certains traits caractéristiques du pluiolessivat sous forêt (enrichissement en Mg, K, Cl) ; pour les autres éléments, il semble qu'il y ait également peu de différences importantes entre forêts et savanes.

TABL. V

Pluiolessivages sous forêt et savanes rapportés à la pluie (quelques mois 1971)

Hauteur d'eau	PVF		PVSL		PVSH	
	PL		PL		PL	
	0,75		0,7		0,7	
	Teneurs	Charges	Teneurs	Charges	Teneurs	Charges
Mg.....	4,7	3,5	4,2	2,9	4,6	3,2
K.....	14	11	11	7,4	7,7	5,6
Cl.....	5,8	4,3	7,2	4,7	6,9	4,9

PVF ; PVSL ; PVSH : pluiolessivages sous forêt ; sous savane à *Loudetia* ; sous savane à *Hyparrhenia*.

VIII. — CONCLUSION : ESSAI DE BILANS APPROXIMATIFS DANS L'ÉCOSYSTÈME SAVANE

A l'entrée « pluie » et à la sortie « drainage » on a ajouté la sortie « feu » de façon à réunir les 3 postes principaux avec lesquels fonctionne l'écosystème (tab. VI). Les pertes dues à l'action combinée du feu et de l'érosion ont été évaluées dans l'annexe 6 en acceptant, étant donné l'absence de données expérimentales, l'hypothèse d'une exportation de 50 % des cendres par ruissellement à l'époque du feu lorsque les tornades du début de la saison des pluies surviennent sur un sol dénudé et couvert de cendres. Les bilans présentés sont approximatifs et une interprétation sera tentée seulement pour N, PO₄ et pour SiO₂ dont le bilan est fortement déséquilibré.

La quasi totalité (fraction 0,9) de N présent dans la strate herbacée est volatilisée au moment du feu (annexe 6). Le bilan tient compte d'une fixation biologique par les bactéries rhizosphériques (BALANDREAU, 1975); il semble excédentaire mais il faudrait encore tenir compte de pertes à l'état gazeux par dénitrification, inconnues.

Le bilan de PO₄ est excédentaire et il serait encore équilibré dans l'hypothèse la plus défavorable où la totalité des cendres serait perdue par ruissellement.

SiO₂, composé le plus abondant du sol, est extrait par altération et éliminé du profil par drainage (forme mobile minérale); il est d'autre part fortement recyclé par la végétation qui le concentre dans ses organes foliaires (265 kg/ha SiO₂; voir annexe 6) avant qu'il soit éliminé par le ruissellement sous forme de cendres (forme mobile biologique bien plus représentée). Par comparaison Al₂O₃ et Fe₂O₃ sont deux composés très stables, résistant au drainage (insolubilités au pH des solutions des sols très supérieures à celle de SiO₂) et au feu (en l'absence de mesures, nous admettons, comme il est classique, que ces composés ne participent pas aux cycles biogéochimiques). Drainage et feu entraînent ainsi dans les bilans comparés des 3 éléments une perte préférentielle en SiO₂ qui contribue à l'évolution géochimique caractéristique des sols ferrugineux tropicaux étudiés.

Les bilans « entrées-sorties » ne font pas apparaître certains aspects essentiels de l'alimentation des écosystèmes; en effet de faibles « entrées » peuvent être associées avec des apports importants dans les horizons superficiels du sol venant des horizons profonds grâce aux remontées racinaires; ainsi en savane la décomposition des racines qui est massive compte tenu de la biomasse et de son taux de renouvellement (École Normale Supérieure, 1974, fascicule 2) réalise dans les 30 premiers cm un « stockage biologique » (DUCHAUFOR, 1972) d'éléments minéraux. Le pluviolessivage sous savane également lié aux remontées racinaires représente un autre mode de retombées biologiques capable d'enrichir les horizons superficiels comme nous l'observons pour K, Mg et peut-être P. Estimés par extrapolation (kg/ha/an) les apports par pluviolessivage sont en savanes à *Loudetia* et à *Hyparrhenia* pour K de 19 (SH) et de 25 (SL) et pour Mg de 14 (SL et SH), bien supérieurs à ceux de la pluie (K, 3, 4; Mg, 4, 8).

TABL. VI

Bilan approximatif des entrées (E) et sorties (S) des principaux éléments
dans l'écosystème savane (kg/ha/an)

	N total	N-NH ₄	N-NO ₃	Ca	Mg	K	Na	PO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
<i>Entrées</i>											
E _p pluie.....	19	2,9	1,6	26	4,8	3,4	11	11	0,5	0,65	3,3
E _f fixation biologique.....	10										
<i>Sorties</i>											
S _d drainage.....	5,6	0,2	0,07	3,5	1,2	1,8	2,6	2,6	0,3	0,4	19
S _f feu + érosion.....	10,5			7,6		8,8	0,4	5,7			133
<i>Bilan</i>											
E _p — S _d	13	2,7	1,5	23	3,6	1,6	8,4	8,4	0,2	0,25	— 16
E _p (+ E _f) — (S _d + S _f).....	12,9			14,9		— 7,2	8	2,7			— 149

En résumé les pertes de l'écosystème sont dues probablement (l'érosion des cendres ayant été estimée) beaucoup plus au feu de brousse qu'au drainage. Les apports de la pluie suffisent aux besoins en N et en P de la végétation qui chaque année se régénère après les feux et grandit jusqu'à recouvrir en plénitude la savane à partir de septembre. La pluie qui est source de mort par ruissellement et drainage est source de vie par son eau mais aussi — et cela est un thème moins exploité — par ses principes nutritifs.

RÉSUMÉ

Dans la savane de Lamto en Côte-d'Ivoire, les eaux de pluie, de pluviolessivage et de drainage (lysimètres) ont été recueillies et analysées quant à leurs teneurs en N total, N-NH₄, N-NO₃, Ca, Mg, K, Na, PO₄, Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂. Les éléments de bilans annuels — hauteurs d'eau, teneurs et charges (hauteurs d'eau × teneurs) — sont présentés. Les charges du drainage annuel moyen (pertes) sont comparées à celles de la pluie (apports) qui sont en kg/ha/an : N total (19) dont une part importante, discutée, de N organique (14), N-NH₄ (2,9), N-NO₃ (1,6), Ca (26), Mg (4,8), K (3,4), Na (10,8), PO₄ (10,7), Fe₂O₃ (0,5), Al₂O₃ (0,6), SiO₂ (3,3). SiO₂ mis à part (19,5 kg/ha/an) les pertes par drainages ne représentent pour les autres éléments qu'une fraction variable mais très inférieure à l'unité des apports par la pluie ; les pertes de N minéral particulièrement faibles sont commentées.

Les apports nets du pluviolessivat sous forêt (apports pluviolessivat — apports pluie) sont (kg/ha/an) négligeables sauf pour Mg (5), PO₄ (10) et surtout K (26). Une courte observation de pluviolessivats sous 2 types de savanes (*Loudetia* et *Hyparrhenia*) constate également un enrichissement en Mg et K.

Compte tenu du feu de brousse, des bilans approximatifs des entrées et des sorties de l'écosystème sont présentés pour les divers éléments.

SUMMARY

In the Lamto savanna (Ivory Coast) rainfall, throughfall and drainage waters were collected and analysed. The total nutrient input through rainfall (kg/ha/year) are : total N (19) containing an important proportion of organic nitrogen (14), N-NH₄ (2,9), N-NO₃ (1,6), Ca (26), Mg (4,8), K (3,4), Na (10,8), PO₄ (10,7), Fe₂O₃ (0,5), Al₂O₃ (0,6), SiO₂ (3,3). But for SiO₂ (19,5 kg/ha/year) losses through leaching are much less than rainfall supply ; mineral N losses, very small, are debated.

The net nutrient contents of throughfall under forest canopy (throughfall contents — rainfall contents) are (Kg/ha/year) negligible but for Mg (5), PO₄ (10) and especially K (26). A brief observation of throughfall under two types of savannas (*Loudetia* and *Hyparrhenia*) show a similar enrichment in Mg and K.

Approximate balance-sheets of inputs and outputs of the ecosystem including bush-fires are given concerning each element.

ANNEXE 1

Hauteurs d'eau et teneurs (ppm) de la pluie

Dates	Haut. eau mm	N total	N-NH ₄	N-NO ₃	Ca	Mg	K	Na	PO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl
1970 28.7 27.8.....	31,2	[6,64)		0,22	2,00	0,80	0,65	1,50	0,60	0,03	0,18	1,0	
28.8 18.9.....	85,3	1,54	0,12	tr	1,05	0,10	0,15	0,50	0,45	0,10	0,15	tr	tr
19.9 1.10.....	76,4	1,45	0,27	0	1,45	0,60	0,30	0,45	1,35	tr	0,18	tr	0,75
2.10 26.10.....	87,3	2,94	0,08	tr	1,50	0,50	0,30	0,80	0,95	0,20	0,23	0,4	
27.10 5.11.....	65,0	2,66	tr	tr	2,08	0,40	0,15	0,48	1,45	0,25	0,15	tr	
6.11 26.11.....	35,3	5,12	0,17	0,29	3,60	0,40	0,50	0,98	1,50	0,01	0,05	2,08	
	12.....	1,8											
1971	1.....	4,8											
11.2.....	18,2	2,34	1,13	0,27	2,10	1,20	0,78	2,15	0,35	0,02	0,07	4,6	
12.2.....	21,1	2,30	0,74	0,32	2,47	0,65	1,18	1,83	0,35	0,06	0,03	0,6	
21+22.2.....	66,6	2,27	0,29	0,19	2,40	0,30	0,18	0,35	2,15	0,05	0,13	0,8	
	2.....	141,5	2,29	0,52	2,36	0,52	0,48	0,95	1,48	0,05	0,10	1,41	
	3.....	66,8	2,74	0,70	3,85	0,50	0,40	0,60	2,50	0,08	0,03	0,01	
	4.....	86,4	2,07	0,42	3,30	0,50	0,45	2,50	1,05	0,01	0,05	0,01	1,25
	5.....	146,6	1,74	0,18	2,80	0,20	0,25	0,73	0,90	0,10	0,13	0,01	
	6.....	217,6	0,84	0,02	2,00	0,50	0,20	1,40	0,85	0,05	0,05	0,01	
	7+8.....	151,7	(5,98)	0,25	1,65	0,65	0,25	0,45	0,82	0,01	0,01	0,1	1,62
	9.....	91,8	(4,34)	0,26	2,92				0,15	0,04			0,50
	10.....	49,5	1,45	0,19	2,30	(0,01)	0,50	0,92	0,20	0,14	0,07		
	11.....	109,4	2,07	0,28	2,42	0,20	0,25	0,60	1,20	0,01	0,03	0,4	0,01
	12.....	22,7	1,47	0,18	1,26	0,25	0,25	0,60	0,42	0,02	0,02	0,65	0,50

CHARGE EN AZOTE ET EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX MAJEURS DES EAUX

ANNEXE 2

Estimation de la hauteur d'eau (mm) du « drainage brut » et du « drainage rectifié »
en année moyenne, en année « humide » et en année « sèche »

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	
													mm	%
1962-1971 E.T.P.	123	134	135	131	131	104	94	85	95	113	125	116	1.386	
Pluie.....	15	60	128	143	173	201	125	70	133	124	79	22	1.276	100
D. brut.....	0	0	0	12	42	97	31	0	38	11	0	0	231	18
D. rectifié.....													131	10
1968 Pluie.....	36	114	128	64	254	280	190	111	279	122	91	20	1.689	100
D. brut.....	0	0	0	0	123	176	96	26	184	9	0	0	614	36
D. rectifié.....													514	30
1969 Pluie.....	0	41	139	130	73	121	35	77	54	141	116	14	943	100
D. brut.....	0	0	4	0	0	17	0	0	0	28	0	0	49	5
D. rectifié.....													0	0

Drainage brut = Pluie - E.T.P. — Drainage rectifié = Drainage brut — 100.

Les données climatologiques et en particulier les données ayant servi à calculer l'E.T.P. par la formule de TURC (1961) proviennent de la station de climatologie de Lamto.

ANNEXE 3

Hauteurs d'eau et teneurs (ppm) du drainage vertical en 1971

Dates	Haut. eau mm	N total	N-NH ₄	Ca	Mg	K	Na	PO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Lys. 1 1971 8.3 9.3.....	21,4	4,0	0,23	1,70	1,90	2,63	2,15	1,90	0,30	0,73	18,6
9.3 10.3.....	28,5	4,68	0,19	1,60	1,40	1,70	1,90	2,30	0,30	0,38	18,6
5.....	31	5,32	0,13	3,65	0,50	1,30	1,95	1,85	0,15	0,33	12,4
6.....	11	4,70	0,09	3,90	0,80	0,95	1,75	2,85	0,20	0,25	11,8
début drain } 9.....	8,5										
fin drain }	92,8	4,45	0,13	2,87	0,90	1,30	2,12	1,62	0,15	0,21	14,30
Lys. 2 1971 22.2 7.3.....	21,0	6,64	0,25	4,10	1,10	1,85	2,40	2,90	0,43	0,95	17,0
8.3 9.3.....	35,7	6,02	0,14	2,00	1,00	1,05	1,95	2,50	0,28	(4,13)	20,2
9.3 10.3.....	42,8	5,04	0,12	2,25	0,96	0,90	1,90	1,90	0,43	0,23	20,4
5.....	28,5	1,65	0,26	4,10	0,80	1,90	2,28	2,80	0,30	0,25	11,0
6*.....	8,4	3,89	0,18	5,65	1,00	1,28	1,50	4,00	0,35	0,15	7,6
Lys. 3 1971 8.3 9.3.....	24,2	7,62	0,23	2,30	1,70	2,25	2,08	3,85	0,30	0,45	17,0
9.3 10.3.....	35,7	3,47	0,18	2,00	1,20	1,30	2,20	1,75	0,18	0,30	17,8
5.....	38,1	4,40	0,13	2,50	0,70	1,80	2,00	1,45	0,18	0,40	16,0
6.....	25,4	1,68	0,01	3,23	1,00	0,85	2,85	1,75	0,15	0,15	11,2
début drain } 9.....	8,5										
fin drain }	110,7	3,61	0,14	2,33	0,75	1,30	1,85	1,57	0,30	0,34	14,50

6* Arrêt des observations (colmatage).

ANNEXE 4

Hauteurs d'eau et teneurs (ppm) du pluiolessivat sous forêt

Dates	Haut. eau mm	N total	N-NH ₄	N-NO ₃	Ca	Mg	K	Na	PO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl
1970 28.7 27.8.....		2,74	0,38	tr	3,75	2,50	10,05	2,90	2,70	0,30	0,28	1,6	
28.8 9.9.....		4,31	0,21	0,11	3,45	1,2	4,38	0,95	3,40	0,18	0,20	0,6	2,5
10.9 18.9.....	54,0	2,41	0,16	0	2,35	0,76	3,60	0,70	2,70	0,23	0,15	0,8	1,75
19.9 30.9.....		2,79	0,33	0	2,40	1,00	3,60	0,43	2,30	0,08	0,18	0,6	1,25
1.10 27.10.....	78,0	3,98	0,24	tr	3,20	1,30	4,28	1,30	2,70	0,03	0,13	1,2	
28.10 5.11.....	32,0	2,83	0,05	0,1	3,35	0,80	2,15	0,88	3,05	0,35	0,20	0,8	
6.11 26.11.....	18,8	5,10	0,19	0,32	4,95	1,20	2,85	1,88	3,0	0,20	0,10	2,70	
12.....	0												
1971 1.1 1.....	2,9	6,73	1,01	1,7	10,00	5,20	20,20	3,03	6,0	0,33	0,05		
11.2.....	11,2	6,24	1,87	0,95	6,20	4,00	12,87	1,43	5,50	0,40	0,10	2,4	6,50
12.2.....	13,5	3,92	0,84	0,5	4,10	2,00	7,16	0,83	3,10	0,28	0,12	1,5	3,75
21+22.2.....	60,0	2,88	0,25	0,29	3,52	1,30	3,35	0,65	3,40	0,20		1,2	
2.....	113,2	3,49	0,56	0,41	3,97	1,77	5,22	0,78	3,63	0,24		1,41	
3.....	48,1	4,06	0,21		8,00	2,10	6,35	1,00	6,10	0,58	0,10	0,01	
4.....	48,6	3,61	0,48		4,80	1,80	4,65	1,60	2,55	0,23	0,08	0,01	4,00
5.....	108,9	2,16	0,24		3,05	0,50	1,90	0,45	2,45	0,18	0,18	0,2	
6.....	182,3	0,90	0,11		2,95	1,00	1,80	0,80	2,05	0,15	0,10	0,4	
7+8.....	114,8		0,22	0	2,75	1,35	2,52	3,29	1,90	0,07	0,05	0,1	8,50
9.....	69,0	3,29	0,40		2,20	0,50	4,18	1,08	1,65	0,04	0,01		1,5
10.....	37,0	2,91	0,48		3,10	1,80	6,70	1,60	2,10	0,29	0,07		
11.....	80,1	2,27	0,48		2,23	1,00	4,00	0,80	1,80	0,01	0,05	0,40	1,50
12.....	19,0	1,75	0,21	0,17	2,55	0,90	2,80	1,20	1,70	0,07	0,02		1,50

ANNEXE 5

Hauteurs d'eau et teneurs (ppm) des pluviollessivats sous savanes

Dates	Haut. eau mm	N total	N-NH ₄	N-NO ₃	Ca	Mg	K	Na	PO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl	
<i>Loudéia</i>	1971 9....	59,3	3,53	0,19		2,31	0,20	1,67	0,65	1,90	0,05	0,09		1,5
	10....	28	2,64	0,17		3,50	1,80	6,00	0,85	1,05	0,31	0,05		
	11....	74,4	1,29	0,24		2,23	1,00	3,22	0,85	1,25	0,01	0,05	1,20	2,25
	12....	15	1,12	0,07	0,13	1,85	0,30	1,40	0,68	0,50	0,05	0,03		1,25
<i>Hypar-rhenia</i>	1971 9....	66,4	3,04	0,35		2,10	0,30	1,40	0,50	0,50	0,02	0,01	1,40	2,5
	10....	39	1,43	0,11		2,42	1,00	2,05	0,75	1,00	0,29	0,07		
	11....	74,4	1,88	0,27		2,70	1,00	2,60	0,55	1,25	0,01	0,05	1,0	1,25
	12....	17,9	1,26	0,05	0,13	2,30	0,80	2,45	0,40	1,35	0,10	0,01		1,50

ANNEXE 6

Estimation des pertes (kg/ha) au moment du feu de brousse

	N total	Ca	K	Na	PO ₄	SiO ₂
Charge strate herbacée....	11	14,5	12	0,5	9,2	265
Charge cendres.....	1,1	13,8	6,5	0,2	7,1	265
Perte feu.....	9,9	0,7	5,5	0,3	2,1	0
Perte érosion.....	0,6	6,9	3,3	0,1	3,6	133
Perte (Feu + érosion).....	10,5	7,6	8,8	0,4	5,7	133

Les charges de la strate herbacée au moment du feu de brousse, et des cendres après passage du feu, ont été mesurées (moyenne 1972-1973) au cours d'un travail non encore publié (CÉSAR, SCHMIDT, VILLECOURT).

Perte feu (volatilisation) = charge strate herbacée - charge cendres.

Perte érosion (entraînement des cendres par ruissellement) = charge cendres × 0,5 (voir le texte).

BIBLIOGRAPHIE

- AVENARD (J. M.), ROOSE (E. J.), 1972. — Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte-d'Ivoire. *Rapport O.R.S.T.O.M.*, Adiopodoumé.
- BALANDREAU (J.), 1975. — Activité nitrogénasique dans la rhizosphère de quelques graminées. *Thèse de Doctorat d'État*, University de Nancy I.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1972. — *Processus de formation des sols*. C.R.D.P. Nancy. École Normale Supérieure, Laboratoire de Zoologie, 1974 - Analyse d'un système tropical humide : la savane de Lamto. *Bulletin liaison chercheurs Lamto*, spécial, 5 fascicules.
- ERIKSSON (E.), 1952. — Composition of atmospheric precipitation. I. - Nitrogen compounds. *Tellus*, 4: 215-232 et 280-303.
- JONES (E.), 1960. — Contribution of rainwater to the nutrient economy of soil in Northern Nigeria. *Nature* (London), 188: 432.
- LEMOALLE, 1972. — Azote et phosphore dans les eaux de pluies à Fort-Lamy (1970). *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Hydrol., 9 (4): 61-63.
- MEYER (J.), PAMFFER (E.), 1959. — Nitrogen content of rainwater collected in the humid central Congo Basin. *Nature* (London), 184: 717-718.
- NYE (P. H.), 1961. — Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and Soil*, 13 (4): 333-346.
- RHAM (P. de), 1973. — Recherches sur la minéralisation de l'azote dans les sols des savanes de Lamto. *Rev. Écol. Biol. Sol*, 10 (2): 169-196.
- RICHARD (C.), 1964. — Pluviométrie et étude physico-chimique des eaux de pluie, Addis-Abéba (1963), *Agron. Trop.*, 19 (12): 1073-1080.
- ROOSE (E. J.), 1972. — Quelques effets des pluies sur la mise en valeur des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux. *Rapport O.R.S.T.O.M.*, Abidjan.
- VEDY (J. C.), 1973. — Relations entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. *Thèse de Doctorat d'État*, Université de Nancy I.
- VIALARD-GOUDOU (A.), RICHARD (C.), 1956. — Étude pluviométrique physico-chimique et économique des eaux de pluie à Saïgon (1950-1954). *Agron. Trop.*, Paris, 11: 74-92.
- VILLECOURT (P.), 1975. — Apports d'azote minéral (nitrique et ammoniacal) par la pluie dans la savane de Lamto. *Rev. Écol. Biol. Sol*, 12 (4): 667-680.
- WETSelaar (R.), HUTTON (S. T.), 1963. — The ionic composition of rainwater at Katherine, N. T. and its part in the cycling of plant nutrients. *Austr. J. Agric. Res.*, 14: 319-329.