



Photo Service Forestier du Cameroun.

*Cameroun : Forêt ombrophile de Nyong. Makak.*

# LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS LES FORMATIONS TROPICALES

Y. DOMMERGUES,

*Directeur de Recherches à l'O.R.S.T.O.M.  
Centre de Pédologie du C.N.R.S., Nancy.*

## SUMMARY

### BIOGEOCHEMICAL CYCLES OF MINERAL ELEMENTS IN TROPICAL FORMATIONS

*An excellent knowledge of the cycle of mineral elements is required in order to carry out any programme of fertilization in forested areas. The various items of information about the different characteristics of these elements in tropical areas, however, have never been properly collated, and therefore it seems necessary to undertake a synthesis of all the results obtained to date.*

*In this article, the author points out three outstanding facts concerning the cycle of mineral elements in tropical formations :*

- 1. The quantity of plant matter being returned to the soil is, on the average, 2 to 5 times greater than in temperate zones.*
- 2. The actual quantities of the elements involved in the annual cycle is much higher in tropical than in temperate zones, especially as regards nitrogen, magnesium and potassium.*
- 3. The rate of decomposition of the plant matter being returned to the soil and the decomposition of the soil's organic matter is much higher in tropical than in temperate areas.*

## RESUMEN

### LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS DE LOS ELEMENTOS MINERALES EN LAS FORMACIONES TROPICALES

*La puesta a punto de la fertilización en los bosques presupone un conocimiento profundo del ciclo de los elementos minerales. Ahora bien, los datos relacionados con las características de estos ciclos en regiones tropicales se encuentran muy dispersos. Por este motivo, ha parecido necesario de efectuar una síntesis de los resultados alcanzados hasta la fecha.*

*En este artículo, el autor pone de manifiesto tres particularidades notables de los ciclos de los elementos minerales en las formaciones tropicales :*

- 1º La masa de residuos vegetales devueltos anualmente al suelo es de 2 a 4 veces más importante, por término medio, que en zona templada.*
- 2º La cantidad de elementos implicados en el ciclo anual es mucho más considerable en zona tropical que en zona templada, y, en particular, por lo que respecta al nitrógeno, al magnesio y al potasio.*
- 3º La descomposición de los residuos vegetales que son devueltos al suelo y la descomposición de la materia orgánica del suelo son mucho más rápidas en medio tropical que en medio templado.*

Si l'emploi d'engrais est généralisé depuis longtemps en agriculture, il n'en est pas de même dans le domaine de la sylviculture tropicale où les problèmes de fertilisation n'ont été jusqu'à présent abordés que dans le cas de la production des plants en pépinière. Mais la demande croissante de bois conduira inévitablement à entreprendre des recherches précises sur la fertilisation des forêts. Ces recherches devront, bien entendu, tenir compte des particularités de la biologie des formations pérennes et notamment du cycle des éléments minéraux. C'est pourquoi il nous a paru intéressant de faire, dans la présente note, le point de nos connaissances actuelles sur les cycles des éléments minéraux en forêt tropicale.

On sait que les éléments minéraux qui sont utilisés par la végétation font ensuite retour au milieu d'où

ils ont été prélevés en passant par des intermédiaires bien définis. Ils circulent donc dans la biosphère suivant des cycles qui ont reçu le nom de cycles biologiques ou mieux cycles inorganiques-organiques ou cycles biogéochimiques (Odum). Mais ces cycles ne sont pas strictement fermés : ils sont l'objet de pertes ou de gains dont l'importance est loin d'être négligeable pour certains éléments. Les pertes deviennent encore plus importantes lors de la mise en exploitation des forêts.

Nous examinerons d'abord la phase de stockage des éléments chimiques dans la masse végétale, puis la phase de restitution de ces éléments au milieu extérieur ; une troisième partie de cette étude sera consacrée aux processus d'enrichissement et d'appauvrissement.

## A. PHASE DE STOCKAGE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS LA MASSE VÉGÉTALE.

Par éléments minéraux, on désigne habituellement les éléments qui assurent la nutrition minérale des végétaux : azote, phosphore, potassium, soufre, calcium, magnésium, fer, manganèse, zinc, cuivre, bore, molybdène, chlore, pour ne citer que les principaux.

L'étude des cycles biogéochimiques porte précisément sur ces éléments. Mais avant d'aborder cette étude, il est indispensable de chercher à estimer l'importance de la photosynthèse dans les formations tropicales. On sait que la photosynthèse est le processus par lequel l'énergie solaire est transformée en énergie chimique qui est elle-même stockée sous forme d'hydrates de carbone (KRAMER et KOZLOWSKI).

Sur le plan pratique, il est plus intéressant de connaître la photosynthèse nette que la photosynthèse totale. La photosynthèse nette correspond à la synthèse de la matière organique dans les tissus végétaux, compte tenu des pertes dues à la respiration. On l'appelle aussi assimilation ou mieux encore production primaire nette (net primary productivity). Elle s'exprime de façon variable : en kilogrammes de glucose ou de carbone organique ou plus simplement en kilogrammes de matière sèche synthétisée par hectare et par jour ou par an (KRAMER et KOZLOWSKI).

Dans une forêt à l'état d'équilibre, telle que celle de Kade, Ghana, NYE a estimé la production annuelle de bois à 11.900 kg/ha, la production annuelle de litière à 10.500 kg/ha et la production annuelle de racines à 2.400 kg/ha, ce qui correspond à une production primaire nette de 24.800 kg/ha/an de matière sèche.

D'après d'HOORN, en forêt de Yangambi, la production primaire nette serait au minimum de 20.000 kg/ha/an.

Pour des formations forestières tempérées (Angleterre), ONUM cite des productions primaires nettes de 31.800 kg/ha/an pour une plantation de Pins pendant sa phase maximum de croissance (20-35 ans) et 15.600 kg/ha/an pour une plantation de feuillus dans des conditions très voisines. A première vue, on pourrait conclure que la production primaire nette de la forêt tropicale est du même ordre de grandeur que la production primaire nette de certaines plantations de Pins en zone tempérée. En fait, la comparaison n'est pas valable car, dans le deuxième cas, il s'agit de plantations aménagées, donc traitées de façon à obtenir le rendement maximum ; ces plantations ont été, en outre, prises dans leur phase de croissance maximum. Il faut, aussi, tenir compte du fait que les estimations concernant les forêts tropicales ont été prudentes et vraisemblablement inférieures à la réalité.

Quoi qu'il en soit, on peut estimer à 20 à 25 t/ha/an la productivité primaire nette en forêt tropicale humide ou semi-humide non aménagée.

### I. — MASSE TOTALE DE MATIÈRE VÉGÉTALE CORRESPONDANT A DIFFÉRENTES FORMATIONS TROPICALES.

Si les données concernant la productivité primaire nette des forêts tropicales sont encore très rares, on dispose, par contre, de renseignements plus complets en ce qui concerne la masse totale de ces formations.

Les résultats les plus détaillés sont relatifs à des formations africaines situées dans la cuvette congolaise d'une part, au Ghana d'autre part.

#### a) Cuvette Congolaise.

L'étude effectuée à Yangambi en 1953 par BARTHOLOMEW, MEYER et LAUDELOUT porte sur des formations secondaires de 18, 8, 5 et 2 ans où le Parasolier (*Musanga cecropioides*) est l'espèce dominante. La masse végétale totale exprimée en tonnes de matière sèche par hectare augmente avec l'âge : de 19 t dans la formation de 2 ans, elle passe à 112 t à 5 ans, 152 t à 8 ans, pour atteindre 175 t à 18 ans (tableau I).

Des formations herbacées ont été étudiées par les mêmes auteurs qui ont trouvé des valeurs comprises entre 39 et 46 t/ha. Des déterminations plus précises effectuées en 1954 par LAUDELOUT et GERMAIN ont montré que la masse végétale dans les formations de ce type peut varier considérablement puisqu'elle oscille entre un minimum de 7 t (*Paspalum conjugatum*) et un maximum de près de 70 t (*Pennisetum purpureum*).

#### b) Ghana.

Les travaux de BARTHOLOMEW ou LAUDELOUT et leurs collaborateurs se rapportent à des formations forestières secondaires relativement jeunes. C'est pourquoi l'étude approfondie, publiée en 1961 par GREENLAND et KOWAL sur une formation d'une quarantaine d'années, présente un intérêt tout particulier. Il s'agit d'une forêt qui, bien que secondaire, peut être considérée comme parvenue à son état d'équilibre. Cette forêt située à Kade, Ghana, est caractérisée par l'association à *Cellis-Triplochiton* et est classée par TAYLOR dans les *moist semi-deciduous forests*.

La masse végétale totale exprimée en matière sèche, dépasse 360 t, par hectare ; c'est plus du double

TABLEAU 1

Stockage des éléments dans la masse végétale (kg/ha)

Site	Type de végétation et âge des éléments de la végétation	Poids total (matière sèche)	N	P	K	Ca + Mg	S
Yangambi, Congo (Bartholomew Meyer et Landelout)	<i>Jachère forestière de 18 ans</i>						
	Feuilles .....	6.442	143	7,5	80	76	17,1
	Litière .....	5.520	75	2,7	8	66	9,9
	Bois .....	114.637	301	62,2	305	378	85,8
	Bois mort .....	17.290	36	1,4	8	36	5,2
	Racines .....	31.240	146	34,2	300	266	78,1
	<b>Total .....</b>	<b>175.109</b>	<b>701</b>	<b>108,0</b>	<b>601</b>	<b>822</b>	<b>196,1</b>
— id —	<i>Jachère forestière de 8 ans .....</i>						
	<i>Jachère forestière de 5 ans .....</i>	152.515	579	35	839	668	101
	<i>Jachère forestière de 2 ans .....</i>	112.289	567	32	456	421	108
		19.712	189	22	186	180	37
Site	Type de végétation et âge des éléments de la végétation	Masse totale (matière sèche)	N	P	K	Ca	Mg
Kade, Ghana (Greenland et Kowal)	<i>Forêt de transition entre la forêt ombrophile et semi-décidue (40 ans)</i>						
	Feuilles et brindilles (trash) .....	25.500	470	32	194	485	66
	Lianes .....	14.400	170	8	63	280	21
	Litière (récoltée au milieu de la saison sèche) .....	2.300	35	1	10	45	6
	Bois moyens avec écorce .....	64.400	288	18	165	483	65
	Bois gros avec écorce .....	108.600	447	27	259	522	102
	Bois mort .....	71.800	230	19	36	524	51
	Souches .....	48.900	186	20	93	186	35
	Racines .....	24.800	214	11	87	145	44
		<b>Total .....</b>	<b>360.700</b>	<b>2.044</b>	<b>136</b>	<b>907</b>	<b>2.670</b>
Ejura, Ghana (Nye)	<i>Savane boisée</i>						
	a) prairie .....	12.660	40	11	56	36	31
	b) arbres et buissons .....	54.320	100	15	146	235	63

de la masse de la forêt secondaire de 18 ans de Yangambi.

Sur ces 360 t, il y a 173 t de bois vivant, contre 115 t à Yangambi, soit environ 50 % de plus (tableau 1). Ces estimations du tonnage de bois sont du même ordre de grandeur que celles qui ont été avancées par BELLOUARD à Téké, Côte d'Ivoire (160 et 190 t/ha).

Il convient de rapprocher de ces chiffres ceux qui ont été obtenus par NYE dans la savane boisée dense d'Ejura (Ghana) où cet auteur estime à 54 t la masse végétale ligneuse et à 13 t la masse végétale herbacée, soit en tout 67 t.

On retrouve des valeurs du même ordre de grandeur dans la savane côtière (coastal scrub) de 10 ans : 58 t. Par contre, les formations herbacées de la même région atteignent seulement 9 t.

En résumé, on peut admettre les chiffres suivants :

— 300 à 400 t/ha pour les formations forestières de la zone tropicale humide parvenues à maturité :

— 150 à 200 t/ha pour les mêmes formations d'une vingtaine d'années ;

— 50 t/ha pour les savanes denses des régions tropicales semi-humides ;

— 7 à 70 t/ha pour les formations herbacées.

Bien entendu, les comparaisons de la masse végétale sur pied ne doivent être faites qu'avec la plus grande prudence, car le taux de croissance varie avec l'âge suivant des lois propres à chaque cas particulier.

## 2. ÉVALUATION QUANTITATIVE DU STOCKAGE DE DIVERS ÉLÉMENTS PAR LA VÉGÉTATION

En examinant successivement les différents éléments, on va voir que les quantités stockées varient considérablement suivant l'âge et le type de végétation.

### a. Azote.

La quantité d'azote stockée peut être considérable, puisque dans le peuplement de Kade, parvenu pra-

Gabon : Forêt ombrophile des bords de la Sangha. Au premier plan, un Azobé

Photo Le Ray.

tiquement à l'état d'équilibre, elle atteint 2.044 kg/ha.

Cette quantité varie suivant l'âge. C'est ainsi qu'à Yangambi elle passe de 189 kg à 2 ans à 701 kg/ha à 18 ans (tableau 1).

Les variations en fonction du type de végétation sont considérables. La comparaison des jachères herbacées de Yangambi est très instructive à ce point de vue. L'azote stocké passe en effet de 74 kg dans la prairie à *Paspalum conjugatum* à 775 kg/ha dans la prairie à *Pennisetum purpureum*. Il est intéressant de remarquer à ce propos que la quantité considérable d'azote stocké dans ce dernier cas est pratiquement identique à celle qui est stockée par la jachère forestière de 18 ans.

En savane boisée, la quantité d'azote stocké varie de 100 à 300 kg/ha environ.

#### b. Phosphore.

La quantité de phosphore stocké est d'environ 100 kg/ha dans les forêts de Kade, Ghana, et de Yangambi, Congo. Si l'on ne tient pas compte des feuilles, des racines et de la litière, la quantité de phosphore stocké est seulement de 60 à 70 kg/ha, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de celle qui correspond aux peuplements de feuillus en Europe (RENNIE).

En savane, ces quantités sont beaucoup plus faibles : 10 à 20 kg/ha. Quant aux formations herbacées, leur richesse varie considérablement suivant les espèces.

#### c. Potassium.

Dans les formations forestières, la quantité de potassium stocké dépasse 500 kg/ha. Elle atteint même 900 kg à Kade, Ghana.

En savane boisée, comme dans beaucoup de for-



mations herbacées, les chiffres correspondants dépassent en général 100 kg/ha.

#### d. Calcium et magnésium.

Dans la forêt de Kade, Ghana, la quantité de calcium stocké est de 2.670 kg/ha. Si l'on ajoute le magnésium, on obtient le chiffre de 3.060 kg/ha contre 822 kg/ha à Yangambi. Si l'on se cantonne au bois, la quantité de calcium stocké à Kade est d'environ 1.000 kg, soit sensiblement la même quantité qu'en Europe.

En savane boisée, malgré les grandes variations, on peut estimer que le stockage de calcium porte sur 200 à 400 kg de cet élément. Comme dans les cas précédents, les formations herbacées accumulent des quantités très variables de calcium allant de 20 à près de 200 kg/ha.

#### e. Soufre.

Le soufre n'a été étudié qu'à Yangambi, le stockage maximum observé étant voisin de 200 kg/ha.

## B. PHASE DE RETOUR AU SOL DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX STOCKÉS DANS LA MASSE VÉGÉTALE

Les éléments minéraux stockés dans la masse végétale retournent au sol :

1. — avec les feuilles mortes (litière) ;

2. — avec le bois mort ;

3. — par l'intermédiaire des racines qui se décomposent ou produisent des excréments ;

TABLEAU 2

Retour des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière (kg/ha/an)

Site et auteur	Type de végétation	Poids total (matière sèche)	N	P	K	Ca	Mg	S
Yangambi, Congo (Laudelout et Meyer)	Forêt mixte .....	12.400	224	7	48	105	53	30
	Forêt à <i>Brachystegia</i> .....	12.300	223	9	62	91	44	30
	Forêt à <i>Macarobium</i> .....	15.300	154	9	87	84	40	20
	Parasoleraie ( <i>Musanga cecropioides</i> ) .....	14.900	140	4	104	127	43	29
Kade, Ghana (Nye)	Forêt dense demi-décidue....	10.500	200	7	68	206	45	...
Colombie (Jenny)	Broad-leaved rain forest .....	8.520						
	Broad-leaved forest .....	12.050						
N. Queensland (Webb)	Rain forest (feuilles seules)...	6.750	96	5	37	75	-	-
Casamance (Maheut et Dommergues)	Teck (4 ans) .....	5.800	38	6	39	132	15	—
	Teck (8 ans) .....	4.700	44	3	31	55	18	—
Caroline du sud (Metz)	Pins .....	5.417	15			20	6	—
	Pins et Feuillus .....	5.748	26			44	10	—
	Feuillus .....	7.270	30			39	20	—
Amérique du Nord (Lutz et Chandler)	Feuillus (moyenne) .....		10	4	15	73	10	—
	Résineux (moyenne) .....		26	2	7	30	5	—
Nouvelle Zélande (Will)	<i>Pinus radiata</i> .....	5.642	38	4	14	27	5	—
	<i>Pinus nigra</i> .....	7.940	36	3	18	51	8	—
	<i>Pseudotsuga taxifolia</i> .....	2.903	22	3	5	26	3	—
	<i>Larix decidua</i> .....	3.691	27	2	4	22	4	—

4. — avec les eaux de pluie qui lessivent le couvert végétal.

Dans la plupart des études portant sur le cycle des éléments minéraux en forêt, on a souvent prétendu que la chute des feuilles constituait le processus essentiel. En fait, on verra que la chute de bois mort ne doit pas être négligée, non plus que l'apport effectué par l'intermédiaire des racines. Quant au lessivage par la pluie des éléments à travers le couvert végétal (leaching of nutrients from the forest canopy), ce n'est que récemment que l'on a découvert l'importance du phénomène : TAMM (1953), WILL (1959), NYE (1961).

#### I. RETOUR DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX AU SOL PAR L'INTERMÉDIAIRE DE LA LITIÈRE

« Depuis longtemps les forestiers se sont préoccupés de connaître la quantité de matière végétale qui retourne annuellement au sol par chute des feuilles, fleurs, fruits, brindilles, etc. La valeur de cet apport annuel est une constante importante pour la détermination de la quantité de litière produite dans des conditions écologiques données. La quantité et la qualité de la litière sont des facteurs importants dans un peuplement forestier, tant du point de vue de sa régénération naturelle que du point de vue des modifications des propriétés du sol » (LAUDELOUT et MEYER).

D'assez nombreuses observations ont été faites par des forestiers ou des pédologues dans les peuplements forestiers des régions tempérées ; mais ce n'est que récemment que les forêts équatoriales ont été étudiées par JENNY, GESSEL et BINGHAM en Colombie (1949), LAUDELOUT et MEYER au Congo (1954), WEBB en Australie (1958), NYE au Ghana (1961). Nous avons nous-même effectué récemment quelques mesures en Casamance (1961).

a) Taux de production annuelle de litière (tableau 2).

La méthode expérimentale adoptée par les différents chercheurs a consisté à récolter à intervalles réguliers — en général chaque mois — la litière sur des cadres ayant une surface d'1 à 2 m<sup>2</sup> avec un nombre suffisant de répétitions par site (environ 10).

**Le poids de la litière retournant au sol, en région tropicale humide est en général de l'ordre de 10 à 12 t/ha (matière sèche).**

C'est ainsi qu'en forêt mixte congolaise, LAUDELOUT et MEYER ont trouvé des chiffres variant entre 12,4 et 15,3 t/ha. JENNY et coll. ont trouvé, pour les forêts humides de Colombie, une chute annuelle de 8,5 à 12,0 t/ha. En forêt dense semi-décidue du Ghana, cette chute est estimée par NYE à 10,5 t/ha.

En Rain Forest du Nord Queensland, WEBB signale une chute annuelle de 6,7 t/ha. En Casamance, c'est-à-dire en zone tropicale semi-humide pluvio-métrie annuelle de 1.600 mm), nous avons évalué à

4,7 et 5,8 t/ha la quantité de litière produite chaque année sous des jeunes teckeraies de 4 à 8 ans.

Ces chiffres dépassent de beaucoup ceux qui ont été publiés par BEAUCORPS pour des plantations d'*Eucalyptus camaldulensis* et *E. gomphocephala* du Maroc où le poids de feuilles tombées oscille entre 2 et 5 t/ha/an.

En Russie d'Europe, d'après SONN, le poids de la litière produite annuellement par hectare oscille entre 1,3 t sous Pins et 6,9 t sous Epicéas. En Norvège, BONNIE-SVENDSEN cité par de BEAUCORPS avance des chiffres de 1 à 3 t/ha suivant la surface terrière. Une synthèse des résultats pour les régions tempérées a été présentée par LUTZ et CHANDLER et plus récemment par EHWALD. Les quantités de débris organiques qui retournent au sol y sont presque toujours comprises entre 2 et 3 t par ha et par an. Les valeurs plus élevées de METZ (5 à 7 t/ha) pour les chutes annuelles de litière dans les forêts de Caroline du Sud sont probablement dues aux conditions de chaleur et d'humidité plus favorables. Il en est de même en Nouvelle Zélande, où WILL a trouvé jusqu'à 6 à 8 t/ha sous Pins.

On peut admettre, en résumé, que la chute annuelle de débris végétaux s'élève à :

10 à 12 t/ha en zone tropicale humide,

5 t/ha en zone tropicale semi-humide,

2 t à 4 t/ha en zone tempérée, avec toutefois dans ce dernier cas des points atteignant en moyenne 7 t/ha dans les conditions favorables.

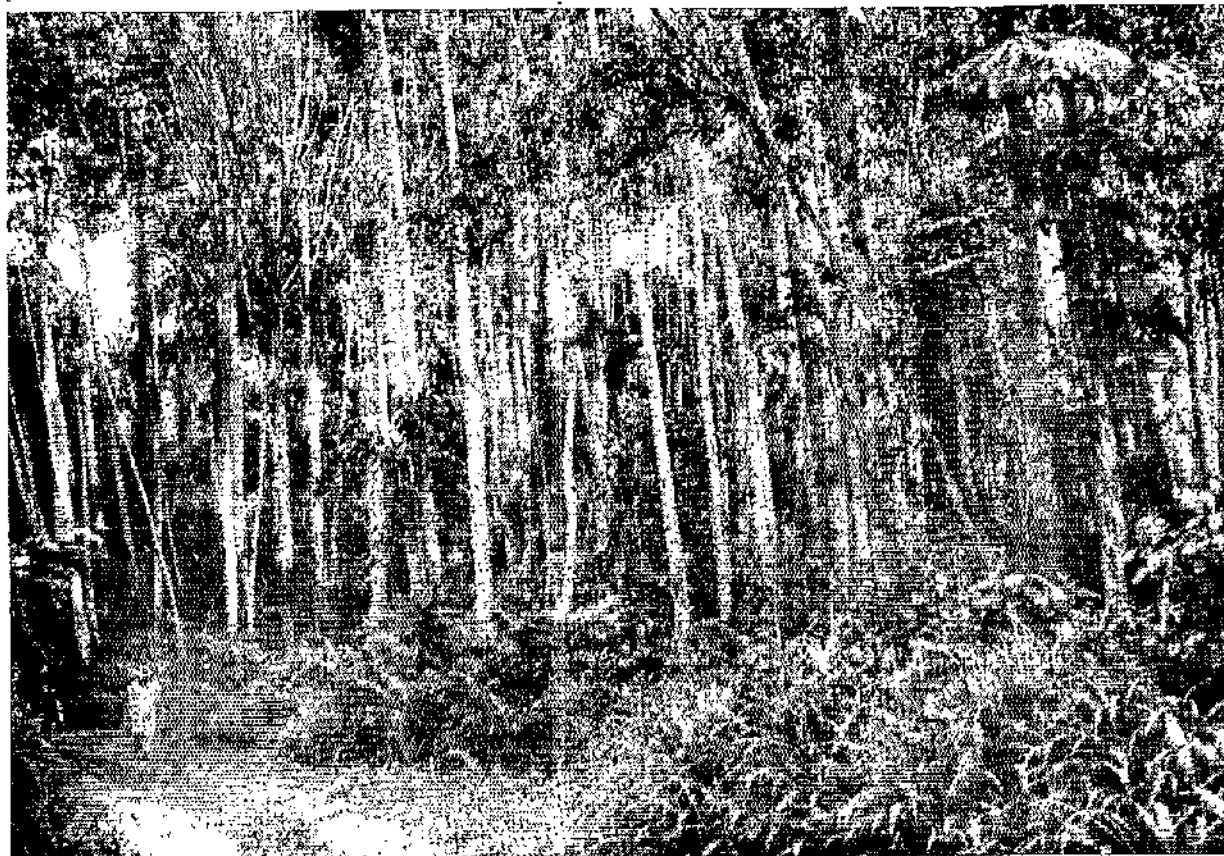
#### b) Variations annuelles.

Les variations au cours de l'année de la chute des feuilles sont sous la dépendance du cycle végétatif. En région tropicale humide, la chute est continue avec deux maxima correspondant aux fins de saison sèche (LAYDELOUT). En région tropicale semi-humide (Casamance), nous avons remarqué que la chute des feuilles de Teck commence deux mois après le début de la saison sèche (décembre) pour s'achever 5 mois après.

D'une année à l'autre, il peut y avoir, comme en climat tempéré, des variations importantes liées à la pluviométrie. C'est ainsi qu'en Casamance, la production de litière de Teck s'est élevée dans deux sites différents à 4,7 t/ha et 5,8 t/ha pendant la saison sèche 1958-1959. Elle était seulement de 4,0 t/ha et 4,3 t/ha à la saison sèche suivante qui

*Parasolaie typique de la région de Souanké (République du Congo)*

Photo Groulez.



succédait à une saison des pluies plus courte et moins humide que la précédente.

Les variations de quantité de litière en fonction de l'âge des peuplements sont encore mal connues en zone tropicale.

### c) Taux de décomposition de la litière.

Deux hypothèses ont été avancées pour définir l'équilibre entre l'apport de la décomposition de la litière : celle de JENNY et celle de NYE.

JENNY et coll. admettent qu'en forêt équatoriale il y a équilibre entre l'apport continu de feuilles et la décomposition de la litière, d'où il résulte un poids pratiquement constant de la litière à l'unité de surface.

On peut écrire qu'en condition d'équilibre l'apport annuel de litière compense la décomposition de la litière et de l'apport annuel.

$$A = K(L + A) \quad (1)$$

où A est la chute annuelle par an, L la quantité de litière en place, K un facteur de décomposition supposé constant.

Ceci constitue évidemment une simplification exagérée des faits. En effet, en forêt équatoriale humide, il y a des fluctuations dans la chute des feuilles qui entraînent inévitablement des variations saisonnières du poids de la litière : il existe donc un certain déphasage entre les rythmes d'accumulation et de décomposition. De plus, le taux de décomposition K ne reste pas constant toute l'année. Toutefois, cette théorie simple rend possible la comparaison des vitesses de décomposition des matières organiques en région tempérée et en région équatoriale.

Le taux de décomposition K ainsi calculé est de :

40 à 60 % pour les forêts humides de Colombie (JENNY) ;

63 à 76 % pour les forêts Congolaises (LAUDELOUT-MEYER) ;

82 % pour la forêt semi-décidue de Kade, Ghana (NYE) ;

6 à 12 % pour les Chênes en Californie (JENNY) ;

1 à 3 % pour les Pins en Californie (JENNY).

En région tropicale semi-humide où la litière est presque intégralement détruite chaque année par la mésofaune et en particulier les termites, le taux de décomposition K, calculé par cette formule, serait voisin de 100 %.

NYE estime que la formule de JENNY, qui a été établie dans le cas où la chute des débris végétaux présente un caractère saisonnier, n'est pas applicable à la forêt tropicale humide où l'apport est continu. On peut penser que, dans ces conditions, lorsque la litière est arrivée à une valeur d'équilibre, l'apport nouveau dans un espace de temps court dT sera égal à la perte dans la même période.

$$A \times dT = K L \times dT \quad (2)$$

ou  $A = K L$

Les symboles utilisés, A et L, ont ici la même signification que dans la formule (1). Le facteur K doit être aussi interprété comme un taux de décomposition supposé constant, mais sa valeur est évidemment différente.

En forêt de Kade, Ghana :

$$\text{où } A = 10.500 \text{ kg/ha/an}$$

$$L = 2.260 \text{ kg/ha/an}$$

le taux de décomposition  $K = \frac{10.500}{2.260} = 465$  % par an, soit 1,3 % par jour, ce qui est très élevé.

Le même calcul appliqué à la forêt humide Congolaise conduit à un taux de 316 %.

La formule (2) est inutilisable dans le cas des formations tropicales semi-humides où la litière disparaît complètement ou presque pendant une partie de l'année (cas de la forêt dense à *Parinari excelsa* ou des teckerales de Casamance).

Quelle que soit la méthode de calcul du taux de décomposition de la litière, il apparaît de 5 à 10 fois plus grand en milieu tropical qu'en milieu tempéré. La valeur très élevée observée à Kade, Ghana, est due à la présence et à l'abondance de la méso et de la microfaune et en particulier aux termites et fourmis. Il en est de même dans les forêts tropicales semi-humides de la Casamance et de la zone Soudano-Guinéenne.

### d) Quantité des divers éléments impliqués dans la chute des débris végétaux.

AZOTE. La quantité d'azote qui retourne au sol avec la litière est de l'ordre de 150 à 200 kg/ha/an en forêt tropicale humide. Cette quantité oscille entre 140 et 244 kg au Congo ; au Ghana, elle atteint 200 kg, contre 96 kg en Rain Forest du Nord Queensland. Ces chiffres sont considérablement plus élevés que ceux qui correspondent à la zone tempérée ou méditerranéenne (20-30 kg/ha/ané).

En zone tropicale semi-humide (teckerales de Casamance), la quantité d'azote retournant au sol avec les feuilles est de 38 à 44 kg/ha/an. Ces valeurs sont donc intermédiaires entre les valeurs obtenues en zone tempérée et les valeurs obtenues en zone tropicale humide.

L'importance de la quantité d'azote retournant au sol par la litière n'est pas seulement due au fait que ce poids total de litière est de 2 à 4 fois plus élevé en zone tropicale qu'en zone tempérée mais aussi au fait que la teneur en azote de la litière est plus élevée. C'est ainsi que 7 t de litière de feuillus en Caroline du Sud correspondent à 30 kg d'azote alors que 6,7 t d'une litière de Rain Forest du Queensland correspondent à 96 kg d'azote ; 5,7 t d'une litière d'un peuplement mixte Pins-feuillus de Caroline du Sud apportent au sol 26 kg d'azote alors que 4,7 t d'une litière de Teck en apportent 44 kg.



Etant donné que les feuilles vivantes ne contiennent pas plus d'azote en zone tropicale qu'en zone humide, Nye a émis l'hypothèse que, chez les espèces des régions tempérées, les migrations de l'azote vers les branches avant la chute des feuilles seraient sensiblement plus importantes.

**PHOSPHORE.** En ce qui concerne le phosphore, les quantités impliquées dans cette partie du cycle ne dépassent jamais 9 kg/ha/an. Bien que plus élevées en moyenne qu'en zone tempérée, elles ne sont jamais très importantes.

**POTASSIUM.** Par contre, les quantités de potassium retournant au sol sont toujours beaucoup plus élevées en zone tropicale qu'en zone tempérée ; elles varient de 31 à 104 kg/ha/an alors qu'en zone tempérée la moyenne est de 7 pour les résineux et de 15 pour les feuillus.

**CALCIUM.** Alors qu'en zone tempérée la quantité de calcium impliquée dans cette partie du cycle est toujours supérieure à la quantité d'azote, il n'en est pas de même en zone tropicale où la situation peut être renversée. C'est ainsi que dans la cuvette congolaise, le calcium ne vient qu'au deuxième rang après l'azote, bien que son rôle soit encore considérable. Par contre, en Casamance, les quantités de calcium et d'azote retournant au sol sont sensiblement les mêmes.

**MAGNÉSIUM.** En zone tropicale humide, la quantité de magnésium impliquée dans le cycle est de l'ordre de 40 à 50 kg/ha/an, contre une quinzaine en zone tropicale semi-humide et 5 à 20 en zone tempérée.

## 2. RETOUR DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX AU SOL PAR L'INTERMÉDIAIRE DU BOIS MORT

Les données concernant ce problème sont rares. La quantité de bois mort tombée en forêt tropicale est, en effet, difficile à estimer, bien qu'elle soit indispensable pour essayer de dresser un bilan complet du cycle des éléments minéraux.

Dans une formation forestière ayant atteint sa maturité, on peut admettre, avec Nye, que la quantité de bois mort tombant annuellement est du même ordre de grandeur que l'accroissement annuel. Dans une forêt du type de celle de Kade, on peut l'estimer à environ 10.000 kg/ha/an. Cette moyenne est d'ailleurs admise par Wreck, cité par Nye, pour la production de bois en forêt tropicale.

Bien entendu, la chute des bois est très irrégulière, car elle est liée à la chute des grands arbres. Il ressort du tableau 3 que le bois mort intervient pour 26 % dans le cycle du calcium, 21 % dans celui du phosphore, 14 % dans celui de l'azote et 11 % dans celui du magnésium.

## 3. RETOUR DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX AU SOL PAR L'INTERMÉDIAIRE DES RACINES

Il est impossible de mesurer directement l'apport au sol des matières minérales provenant de la décomposition des racines. On peut toutefois supposer que, dans une formation parvenue à maturité, les quantités de matière organique produite au-dessus et au-dessous du sol sont dans le même rapport que les poids des parties aériennes et souterraines.

Dans la forêt de Kade, Ghana, GREENLAND et KOWAL ont évalué le poids des racines à 24.800 kg alors que le poids de la végétation au-dessus du sol est de 214.000 kg (feuilles et brindilles, lianes, bois à l'exclusion des souches et du bois mort). Comme la production annuelle de litière et de bois atteint 22.400 kg/ha/an, la production de racines est de l'ordre de 2.400 kg/ha/an. Etant donné que cette forêt est parvenue à l'état de maturité, l'accroissement net du poids des racines est faible, et ce chiffre constitue une estimation de l'addition annuelle des racines mortes au sol.

On connaît l'existence des excréments radicaires dans les cultures provenant à maturité. Il est probable que de telles excréments apparaissent en forêt à certains moments ; mais on ignore complètement l'importance de ces processus (Nye).

TABLEAU 3

Part des différents processus dans le retour au sol des éléments minéraux dans la forêt ghanéenne étudiée par Nye (kg/ha/an).

Retour au sol par	Poids	Éléments minéraux				
		N	P	K	Ca	Mg
Litière .....	10.500	200	7,3	68	206	45
Bois mort .....	10.000	38	2,9	6	82	8
Lessivage du couvert par l'eau de pluie .....		12	3,7	220	29	18
Total .....		248	13,9	294	317	71

#### 4. LESSIVAGE DU COUVERT PAR LES EAUX DE PLUIE

TAMM (1953), dans une étude portant sur 6 essences feuillues et 2 essences résineuses en Suède, a montré que des quantités considérables de certains éléments (potassium en particulier), pouvaient être lessivées par les eaux de pluie percolant à travers les houppiers des arbres. D'autres éléments (sodium et calcium par exemple) ne subissent qu'un entraînement insignifiant.

WILL (1959), opérant en Nouvelle-Zélande sur des peuplements de résineux introduits (*Pinus radiata*, *Pinus nigra* var. *Laricio*, *Pseudotsuga taxifolia*, *Larix decidua*), a constaté que, sous *Pinus radiata* et sous *Pseudotsuga taxifolia*, deux tiers du potassium retournant au sol provenaient du lessivage des houppiers par les eaux de pluie. Sous *Pseudotsuga taxifolia*, la moitié du phosphore retournant au sol provient également du lessivage par les eaux de pluie. Quant au lessivage du calcium et du sodium, il a été toujours faible, à l'exception d'un cas correspondant à un sol riche en sodium échangeable.

NYE (1961) est le premier à avoir étudié ce phénomène en forêt tropicale. Travaillant toujours en forêt humide ghanéenne, cet auteur a montré que, comparativement à la litière, le lessivage des éléments des houppiers par les eaux de pluie, ramenait au sol 3 fois plus de potassium, 0,5 fois plus de phosphore et de magnésium et de faibles quantités de calcium et d'azote.

Les quantités de potassium entraînées sont extraordinairement élevées et l'extrême mobilité de cet élément observée par Tamm est donc confirmée en région tropicale. Cette mobilité s'explique sans doute par le fait que les deux tiers environ du potassium des plantes n'est pas lié fortement et est soluble immédiatement dans l'eau (CHAMINADE).

Par contre, les quantités d'azote nitrique entraîné par les eaux de pluie sont très faibles; quant à l'azote ammoniacal, il est pratiquement absent.

NYE a montré en outre que les éléments mobiles étaient lessivés essentiellement sous forme de bicarbonates.

L'anion sulfate n'a été trouvé en quantité importante que par HIESSE (1957) au Kenya sous *Acacia* et *Eucalyptus*, mais seulement lors de la première pluie de la saison sèche.

En se basant sur le cas de la forêt de Kade, Ghana, pour laquelle on dispose des données précises (tableau 3), on constate que la quantité des éléments retournant au sol avec les eaux de pluie, comparée à la quantité globale de ces mêmes éléments impliquée dans le cycle annuel, représente :

- 75 % pour le potassium,
- 27 % pour le phosphore,
- 25 % pour le magnésium,
- 9 % pour le calcium,
- 5 % pour l'azote.

Il est vraisemblable que les éléments lessivés par les eaux de pluie jouent un rôle important dans la

TABLEAU 4

Taux de décomposition de la matière organique du sol dans différentes formations naturelles (NYE et GREENLAND)

Localité	Pluviométrie en mm/an	Quantité de carbone retournant au sol avec la litière (L) ou les racines (R) en kg/ha/an	Teneur du sol en carbone en kg/ha	Taux de décomposition K maximum %	Taux de décomposition K minimum %
<i>Forêts tropicales de basse altitude</i>					
Colombie .....	8.380	L 3.920	394.000	0,51	0,20
Ghana .....	1.520-2.030	5.400	109.000	2,47	1,00
Inde .....	—	5.400	51.000	5,15	2,18
Congo .....	1.800	6.150	80.000	5,15	2,04
Indonésie .....	3.050	5.400	74.000	3,64	1,46
Moyenne (sauf la Colombie) .....	—	5.587	72.000	4,18	1,67
<i>Forêts tropicales d'altitude</i>					
Colombie .....	2.790	L 5.100	403.000	0,63	0,25
Indonésie .....	2.540	5.400	348.000	0,77	0,31
Madagascar .....	2.030	5.400	350.000	0,80	0,31
Moyenne .....	—	5.300	360.000	0,78	0,29
<i>Savane tropicale</i>					
Humide .....	1.270	R 1.500	51.000	1,33	0,53
Sub-humide .....	890	450	17.000	1,22	0,49
<i>Zone tempérée</i>					
Chênes .....	780	L 780	90.000	0,43	0,17
Pins .....	760	1.700	88.000	0,95	0,39
Prairie .....	860	1.450	137.000	0,44	0,17



Photo Aubreville.

Côte d'Ivoire : Forêt semi-décidue, limite de la forêt dense près d'Ouiné.

nutrition des arbres, car ils parviennent au sol sous une forme soluble, donc facilement assimilable.

### 5. STOCKAGE ET TAUX DE DÉCOMPOSITION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL.

Lorsque l'on étudie la matière organique, en particulier sous une formation pérenne, il y a lieu de distinguer :

a) L'évolution de la litière et autres débris végétaux (racines par exemple) qui subissent au niveau du sol une décomposition aboutissant à leur transformation en matériel humifié ;

b) L'évolution du matériel humifié proprement dit, ou *matière organique du sol* prise dans son ensemble, qui subit à son tour une décomposition suivant un rythme qui lui est propre (NYE).

Le premier problème (a) a été examiné plus haut. On abordera ici le deuxième (b) en procédant de la même manière, c'est-à-dire en donnant pour les formations végétales les mieux connues, les valeurs

des taux de décomposition de la matière organique du sol.

On a fait figurer, sur le tableau 4, les valeurs des taux maxima et minima de décomposition K pour les forêts tropicales de basse altitude, les forêts tropicales d'altitude, la savane tropicale et les forêts de la zone tempérée.

De la comparaison des chiffres obtenus dans ces conditions très variées, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

a) Sous un même climat, le taux de décomposition K diminue considérablement avec l'altitude : par exemple, pour sa valeur maximum, il passe de 4,18 % pour la moyenne des forêts tropicales de basse altitude à 0,73 % pour les forêts d'altitude.

b) Les sols de savane tropicale sont caractérisés, à altitude égale, par un taux de décomposition K beaucoup plus faible que les formations forestières correspondantes. NYE explique cette différence par le fait que la végétation herbacée exerce une influence modératrice sur la décomposition de l'humus dans le sol.



Forêt de Bamoro (Côte-d'Ivoire)  
Plantation du Teck âgée de 5 ans sur bon sol.

Photo Bellouard.

De leur côté, GREENLAND et KOWAL comparant, en forêt ghanéenne, la composition cationique moyenne de la masse végétale sur pied et la composition cationique du complexe absorbant du sol, ont prouvé que la répartition des trois cations Ca, Mg, K dans le sol était très voisine de celle qui caractérise la masse végétale.

L'augmentation de la teneur des horizons supérieurs du sol en bases échangeables, notamment en calcium, va de pair avec une élévation du pH. Le phénomène est classique sous teckeraie en Afrique Occidentale. C'est ainsi qu'à Bamoro, en Côte d'Ivoire, DABIN, cité par AUBERT, a obtenu les chiffres suivants :

Profondeur	pH
0- 25 cm .....	6,8
50 cm .....	6,1
70 cm .....	6,3
100 cm .....	6,3

Nous avons nous-même observé un accroissement hautement significatif du pH de 0,5 unité après reboisement en Teck sur un sol faiblement ferrallitique de Casamance.

Dans une formation forestière naturelle de Nigeria, BATES a noté que le pH qui restait fixé à 6,7 entre 5 cm et 130 cm montait brutalement à 7,7 dans l'horizon 0-5 cm.

L'élévation du pH dans les horizons supérieurs du profil qui peut être observée avec netteté sous végétation forestière, est par contre inexistante sous savane (AUBERT).

Les processus d'enrichissement des horizons superficiels ne jouent pas seulement pour les éléments basiques mais aussi pour le phosphore et d'autres éléments (AUBERT et PINTA). Dans le sol ferrallitique de Dakpadou dans l'Ouest de la basse Côte d'Ivoire, ces auteurs ont en effet trouvé :

	Zn	Co	Fe	Cu	Mn
en surface .....	3	0,3	13,0	1,4	24,0
à 1 m .....	3	0,04	3,5	0,6	1,0
de 1,2 m à 1,5 .....	4	0,06	7,0	1,4	4,2
de 2 m à 2,25 .....	6	0,08	9,5	1,2	2,3

Tous ces résultats confirment le phénomène de concentration en surface des éléments extraits des horizons profonds par la végétation forestière.

Une conséquence remarquable de cette remontée biologique relativement très importante des éléments du sol réside dans le fait qu'en zone tropicale

c) En zone tempérée, les taux de décomposition K sont du même ordre de grandeur que dans les forêts tropicales d'altitude.

## 6. STOCKAGE D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS CERTAINS HORIZONS DU SOL

La décomposition des débris végétaux en surface du sol a pour conséquence l'accumulation dans l'horizon supérieur de bases et d'éléments nutritifs que les racines ont puisé dans les horizons de profondeur.

Cette accumulation d'éléments minéraux en surface est suffisamment importante dans certains cas pour que la composition chimique du sol reflète avec fidélité la composition du matériel végétal retournant au sol.

C'est ainsi qu'à Yangambi, LAUDELOUT et MEYER ont montré que les proportions relatives des trois cations Ca, Mg, K dans le sol étaient de 44 % pour Ca, 38 % pour Mg, 18 % pour K, lorsque dans le matériel végétal retournant au sol ces proportions étaient de 45 % pour Ca, 39 % pour Mg, 21 % pour K.

humide, hors le cas des sols dont l'oligotrophie est extrême, il ne semble pas que la richesse nutritive du sol joue un rôle important dans la différenciation des groupements forestiers. C'est ainsi que LEMÉE a remarqué en Côte d'Ivoire que « la forêt semi-décidue à *Cellis* et *Triplochiton* se retrouve floristiquement semblable sur les pentes de collines amphibolitiques et sur les granites leucocrates ».

Dans les formations jeunes, l'extraction des éléments fertilisants du sous-sol par les racines est indiscutable car le système racinaire est alors bien développé en profondeur. Des observations méthodiques effectuées à Yangambi, Congo, par BARTHOLOMEW ont en effet montré que plus de 32 % (en poids) des racines dépassaient 25 cm de profondeur. Il n'en est plus de même dans les formations âgées, comme la forêt de Kade, Ghana, où

l'on a deux fois moins de racines en profondeur (15 %) que dans le cas précédent (32 %). Comment expliquer, dans ces conditions, la remontée des éléments ? On peut supposer que la distribution en poids des racines n'est pas nécessairement en corrélation avec l'activité absorbante (feeding activity). On peut penser aussi que, dans une formation parvenue à l'état de maturité ou d'équilibre, la majorité des éléments nutritifs est absorbée en surface. Il n'y aurait donc concentration en surface des éléments que pendant les premières années d'installation d'un peuplement ligneux sur un sol donné.

Il est vraisemblable aussi, que parallèlement à cette remontée des éléments, la végétation puisse entraîner en surface la libération d'éléments préexistants sous forme non échangeable.

### C. PROCESSUS D'ENRICHISSEMENT ET D'APPAUVRISSMENT DES FORMATIONS TROPICALES

Ces processus sont encore très mal connus en région tropicale. Si l'on commence à avoir quelques données

sur le cycle de l'azote, on n'a pratiquement aucun renseignement en ce qui concerne les autres éléments.

*Cameroun : Savane boisée près de Meiganga*

Photo Service Forestier du Cameroun.



TABLEAU 5

Accroissement du stock d'azote dans différentes formations tropicales (LAUDELOUT et coll., GREENLAND, DOMMERGUES)

Lieu	Age des formations forestières	Quantité totale d'azote stocké dans la masse végétale en kg/ha	Accroissement moyen annuel du stock d'azote en kg/ha/an
Yangambi, Congo .....	5 ans	570	114
Yangambi, Congo .....	18 ans	760	39
Kade, Ghana .....	40 ans	2.100	52
Malika, Sénégal .....	13 ans	531	41

## 1. GAINS

### a) Fixation de l'azote.

En dehors de l'apport d'azote par les eaux météoriques que nous examinerons au paragraphe ci-dessous, l'enrichissement en azote des sols tropicaux se fait essentiellement par l'intermédiaire de la fixation symbiotique et par l'intermédiaire de la fixation non symbiotique.

Dans les formations forestières tropicales humides, la fixation d'azote calculée à partir de l'azote stocké par la végétation au bout d'un temps variant entre 5 et 40 ans est en moyenne de 40 à 50 kg mais peut dépasser 100 kg (BARTHOLOMEW, GREENLAND et KOWAL). Dans des reboisements en Filao (*Casuarina equisetifolia*) sur sols dunaires du Cap-Vert (Malika), nous avons déterminé un accroissement moyen du stock d'azote de 41 kg/ha/an.

A l'accroissement de la teneur en azote de la masse végétale, il faut ajouter l'accroissement de la teneur en azote du sol, qui est de l'ordre de 20 à 60 kg/ha/an (GREENLAND et NYE). Sous les peuplements de Filao de la presqu'île du Cap-Vert, nous avons estimé la fixation d'azote dans le sol à 18 kg/ha/an.

Considérant l'ensemble de l'écosystème complexe sol-végétation, GREENLAND a évalué l'accroissement net total de la teneur en azote à une valeur comprise entre 60 et 170 kg/ha/an, suivant les conditions édaphiques, l'âge et la vigueur de la végétation forestière. Quant à l'écosystème sol-reboisement en Filao de la presqu'île du Cap-Vert, il fixe au total 59 kg d'azote par ha et par an.

Le gain annuel total est égal au gain net plus les pertes par lessivage et dénitrification. On a peu de renseignements sur ces pertes, mais on peut affirmer que l'accroissement net représente le taux minimum de fixation annuel.

Cette fixation de 170 kg/ha/an est de l'ordre de grandeur de celle qui correspond aux cultures de Légumineuses en zone tempérée. Mais la contribution des Légumineuses est vraisemblablement réduite dans les formations forestières tropicales, car leur proportion en forêt est inférieure à 10% et il faut souligner qu'une partie seulement des Légumineuses porte des nodosités fixatrices d'azote.

Beaucoup d'auteurs attribuent ces gains en majeure partie à des microorganismes fixateurs du type *Azotobacter*, *Beijerinckia* et *Clostridium* ainsi qu'à des Algues. Mais le problème est encore mal connu et l'étude de l'écologie de ces germes n'est pas assez avancée pour préciser leur rôle exact dans les processus de fixation (GREENLAND). Dans le cas des reboisements en Filao, la fixation d'azote se fait incontestablement en grande partie par l'intermédiaire des nodosités.

Lorsque les formations forestières parviennent à maturité et que le taux de matière organique du sol atteint son palier d'équilibre maximum, la fixation nette d'azote tend vers zéro.

Dans les formations herbacées, la fixation annuelle d'azote par la végétation ne dépasse pas 22 à 110 kg/ha; la fixation par le sol ne dépasse que rarement 22 kg/ha/an.

### b) Apport d'azote par les eaux météoriques.

« Un préjugé très répandu, par suite de la fréquence, et de l'intensité des décharges durant les orages tropicaux, veut que l'eau de pluie apporte des quantités très importantes d'azote au sol, nettement plus élevées qu'en régions tempérées ».

En fait, il n'en est rien et « il semble raisonnable d'admettre qu'en moyenne, 5 à 6 kg d'azote inorganique par hectare et par an retournent au sol par l'eau de pluie sous les tropiques » (LAUDELOUT, MEYER, PEETERS).

## 2. Pertes.

Différents processus contribuent à l'appauvrissement des sols forestiers en éléments minéraux. Ce sont plus particulièrement :

- les phénomènes de lessivage, d'entraînement de bases notamment ;
- certaines processus d'origine biologique, tels que la dénitrification ;
- les phénomènes d'érosion ;
- l'exportation d'éléments résultant de l'exploitation ou des cultures itinérantes.

Ici encore nos connaissances actuelles se limitent pratiquement à quelques aspects du cycle de l'azote.

### a. Pertes par lessivage.

#### — PERTES D'AZOTE PAR LESSIVAGE.

Ces pertes peuvent, en principe, être mesurées facilement à l'aide de lysimètres. Malheureusement, la plupart des dispositifs en service présentent l'inconvénient de mal drainer et d'être à l'origine de processus de dénitrification.

En l'absence de données sûres obtenues par cette méthode, on a cherché à déterminer les quantités d'azote évacuées d'un bassin de réception en dosant, dans l'eau des rivières, les composés azotés et en mesurant le débit et la surface drainée. Mais de tels calculs sont rendus difficiles par suite des variations brusques de concentration et de débit. D'autre part, les composés azotés peuvent être ou absorbés ou dénitrifiés à la suite de leur départ de la zone d'enracinement des végétaux. Les chiffres obtenus par cette méthode sont de l'ordre de 11 kg/ha/an, ce qui est bien inférieur aux résultats obtenus avec les lysimètres (GREENLAND).

On peut rapprocher de ces chiffres ceux des pertes totales en azote calculées dans les sols cultivés qui oscillent suivant les cas entre 30 et 210 kg/ha/an.

#### — PERTES DE SOUFRE PAR LESSIVAGE.

HESSE a montré que, dans les sols forestiers de l'Est Africain, les pertes par lessivage des sulfates étaient réduites, car cet élément est repris par les racines profondes des arbres.

#### — ENTRAÎNEMENT DES ÉLÉMENTS EN PSEUDOSOLUTIONS.

A côté des pertes par lessivage des éléments facilement entraînés en solution, on signalera les pertes par lessivage d'éléments entraînés en pseudosolutions (oxydes et hydroxydes métalliques, fer notamment). Mais on ne possède pratiquement pas de données quantitatives sur ces processus (d'HOORH).

### b. Pertes d'azote par dénitrification.

Il est difficile d'évaluer directement les pertes d'azote par dénitrification, car ces pertes sont en général relativement faibles et compensées par les gains dus à la fixation.

Les expériences effectuées au laboratoire ont montré que les processus de dénitrification n'apparaissent que dans les sols très riches en nitrates,

mal aérés et largement pourvus en carbone fermentescible, cette dernière condition n'étant pas indispensable dans le cas des sols forestiers. Au champ, il existe, à certaines époques, dans le sol, de fortes doses de nitrates et il est possible que lors des premières pluies les phénomènes d'engorgement favorisent la dénitrification (GREENLAND).

### c. Pertes dues à l'érosion.

Ces pertes sont relativement peu importantes sous forêt et en général inférieures à celles qui caractérisent les sols cultivés. Mais on ne peut les négliger. Elles sont dues non seulement à l'érosion en nappe, mais aussi à l'érosion en masse par arrachement ou glissement.

#### — EROSION EN NAPPE.

Dans les parcelles expérimentales d'Adiopodoumé Côte d'Ivoire, FOURNIER a évalué la perte de terre par érosion en nappe à 2,5 t/ha/an sous forêt, à 40 t/ha/an sous engrais vert et 118 t/ha/an dans le cas du sol nu. « D'après G. MANGENOT, la forêt dense limite l'érosion moins que la forêt tempérée car sa litière est séparée du sol et permet aussi le passage de l'eau entraînant la terre entre ces deux surfaces : cette litière est elle-même beaucoup moins dense dans le premier cas » (AUBERT).

#### — EROSION EN MASSE.

« En dehors de l'érosion en nappe, l'on peut observer sous forêt dense une érosion en masse par arrachement de terre par les arbres déracinés ou par glissement lent, le long des versants, de masses de terre avec toute leur couverture végétale » (AUBERT).

### d. Pertes résultant de l'exploitation forestière et des cultures itinérantes.

Les pertes résultant de l'exploitation forestière sont parfois importantes mais leur importance en forêt tropicale n'a pratiquement pas encore été étudiée. Quant au bilan des éléments minéraux dans le cas des cultures itinérantes en forêt, on commence à disposer d'un certain nombre de données précises. Mais il s'agit là d'un problème qui sort du cadre de la présente étude et nous n'y faisons allusion que pour mémoire.

## Conclusions

L'étude des cycles biogéochimiques dans les formations tropicales n'est qu'à son début. Certains aspects de ces cycles sont encore insuffisamment explorés ; il en est cependant d'autres sur lesquels on dispose, dès à présent, de données assez précises pour comparer utilement les processus se déroulant en zone tropicale et ceux qui intéressent la zone tempérée.

Les cycles biogéochimiques des formations tropicales présentent trois particularités remarquables :

1° La masse des débris végétaux retournant annuellement au sol est 2 à 4 fois plus importante en moyenne qu'en zone tempérée.

Des travaux sur la litière, il résulte en effet que la chute annuelle des débris végétaux s'établit à :

10 t à 12 t en zone tropicale humide,  
 5 t en zone tropicale semi-humide,  
 2 t à 4 t en zone tempérée, avec toutefois mais  
 exceptionnellement des pointes atteignant 7 t dans  
 les conditions les plus favorables.

2° La quantité d'éléments impliquée dans le  
 cycle annuel est beaucoup plus considérable en  
 zone tropicale qu'en zone tempérée, notamment  
 en ce qui concerne l'azote, le magnésium et le potas-  
 sium.

3° La décomposition des débris végétaux  
 retournant au sol est beaucoup plus rapide en  
 milieu tropical qu'en milieu tempéré, les taux de  
 décomposition étant jusqu'à dix fois plus élevés  
 dans le premier cas que dans le second. La décompo-  
 sition de la matière organique du sol est très sensi-  
 blement plus rapide en zone tropicale qu'en zone  
 tempérée.

Les deux premiers caractères des cycles biogé-  
 chimiques expliquent l'enrichissement relatif très  
 important des horizons superficiels du sol sous forêt  
 tropicale qui entraîne lui-même :

a) une modification de l'équilibre cationique du  
 complexe absorbant des horizons supérieurs du sol  
 qui tend à refléter la composition chimique du maté-  
 riel végétal ;

b) une remontée du pH ;

c) une atténuation du rôle exercé par le sol sur  
 la différenciation des groupements végétaux péren-  
 nes et, inversement, un accroissement de l'influence  
 de la végétation forestière sur les sols ;

d) une vulnérabilité plus grande à l'érosion résul-  
 tant de l'accumulation des éléments fertilisants en

surface, donc dans la partie du profil la plus exposée  
 aux agents érosifs dont l'action se développe rapi-  
 dement dans le cas de défrichement.

En ce qui concerne la vitesse d'évolution des sols  
 tropicaux, on a souligné souvent la rapidité de  
 dégradation à la suite d'une rupture d'équilibre, par  
 exemple lors de la destruction du couvert végétal.  
 Mais il est vraisemblable que la réédification du  
 stock de matière organique du sol est également  
 aussi plus rapide sous les tropiques qu'en zone tem-  
 pérée. « On ne peut pas conclure de là qu'il sera plus  
 facile d'accroître la teneur en matière organique  
 d'un sol sous les tropiques, mais simplement que,  
 si l'on assure un retour adéquat de débris organiques  
 au sol, la teneur d'équilibre de la matière organique  
 du sol sera atteinte beaucoup plus rapidement que  
 dans des situations comparables, mais à basse tem-  
 pérature » (LAUDELOUT, MEYER, PEETERS).

Il n'a été fait que rarement allusion aux zones  
 tropicales semi-humides ou sèches, car les données  
 concernant ces régions sont encore insuffisantes.  
 Alors qu'on a reconnu l'importance de la « frost free  
 line » en deçà de laquelle les fortes gelées arrêtent,  
 pendant une partie de l'année, la photo-synthèse,  
 on n'a, semble-t-il, pas attaché jusqu'à présent  
 assez d'importance à ce que l'on pourrait appeler la  
 « ligne de sécheresse physiologique » qui marque la  
 limite entre la zone tropicale humide et la zone tro-  
 picale sèche. Pourtant, il apparaît de plus en plus  
 certain que les régions tropicales sèches et semi-  
 humides sont, par leurs caractéristiques écologiques,  
 aussi différentes des régions tropicales humides  
 qu'elles le sont des régions tempérées.

## BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.). — 1954. Les sols latéritiques. *C. R. 5<sup>e</sup> Congrès international Sci. Sol. Léopoldville*, I, 103-118.
- AUBERT (G.). — 1959. Influence des divers types de végétation sur les caractères d'évolution des sols en régions équatoriales et sub-équatoriales ainsi que de leurs bordures tropicales semi-humides. *Sols et végétation des régions tropicales. Colloque d'Abidjan, UNESCO*.
- BARTHOLOMEW (W. V.), MEYER (J.) et LAUDELOUT (H.). — 1953. Mineral nutrient immobilisation under forest and grass fallow in the Yangambi region, with some preliminary results on the decomposition of plant material on the forest floor. *Publ. Inst. Nat. Etude Agron. Congo Belge sér. Sci.* 57, 1-27.
- BATES (J. A. R.). — 1960. Studies on a Nigerian forest soil I. The distribution of organic matter in the profile and in various soil fractions. *J. Soil. Sci.* II, 246-256.
- BEAUCORPS (G. de). — 1959. Rapports entre les peuplements d'Eucalyptus et les sols sableux de la Mamora et du Rharb. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, tome 5.
- CHAMINADE (R.). — 1954. Le potassium et la matière organique. *Potassium symposium, Rome*, 203-14.
- DOMMERGUES (Y.). — 1963. Evaluation du taux de fixation de l'azote dans un sol dunale reboisé en Filao. *Agrachimica* (sous presse).
- DUCHAUFOR (Ph.). — 1960. Précis de Pédologie. *Masson, Paris*.
- DUCHAUFOR (Ph.). — 1961. Le rôle de la végétation dans l'évolution des sols. *Bulletin de l'A. F. E. S.*, 168-93.
- EHWALD (E.). — 1957. Ueber den Nährstoffkreislauf des Waldes. *Sitz. ber. Deutsche Akad. Landw.* Berlin, 6, 1-56.
- FOURNIER (F.). — 1958. Contribution à l'étude de la conservation des sols en Afrique Occidentale Française. O. R. S. T. O. M., Paris (Thèse secondaire).
- GREENLAND (D. J.). — 1959. Nitrogen gains & losses in tropical soils. *C. R. 3<sup>e</sup> conférence interafricaine des sols, Dabat*, I, 531-535.
- GREENLAND (D. J.) et KOWAL (J. I. M.). — 1960. Réserve nutritive de la forêt tropicale humide du Ghana. *Plant & Soil*, 12, 2, 154-174.
- GREENLAND (D. J.) and NYE (P. H.). — 1959. Increases in carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *J. Soil. Sci.* 9, 284-299.
- HESSE (P. R.). — 1957. Sulphur and nitrogen changes in forest soils of East Africa. *Plant and Soil*, 9, 86-96.
- HILLS (G. A.). — 1958. Soil forest relationships in the site regions of Ontario. *First north american forest soils conference. Agricultural experiment station, Michigan State University, East Lansing*.
- HOORE (J. d'). — 1959. Influence de la mise en culture sur l'évolution des sols dans la zone de forêt dense de basse et moyenne altitude. *Sols et végétation des régions tropicales. Colloque d'Abidjan, UNESCO*.



- JENNY (H.), GESSEL (S. P.) et BINGHAM (F. T.). — 1946. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil. Sci.* 68, 419-32.
- KRAMER (P. J.) et KOZLOWSKI (T. T.). — 1960. Physiology of trees. Mc Graw Hill, New-York.
- LAUDELOUT (H.), MEYER (J.). — 1954. Les cycles d'éléments minéraux et de matière organique en forêt équatoriale congolaise. *C. R. 5<sup>e</sup> Congr. intern. Sci. Sol. Léopoldville*, 2, 267-272.
- LAUDELOUT (H.) et GERMAIN (R.). — 1954. Premiers résultats sur la dynamique chimique des jachères herbacées et des pâtures à Yangambi. *C. R. 5<sup>e</sup> Congr. intern. Sci. du sol, Léopoldville*, 2, 312-321.
- LAUDELOUT (H.), MEYER (J.) et PEETERS. — 1960. Les relations quantitatives entre la teneur en matière organique du sol et le climat. *Agricultura*, 8, 1, 103-140.
- LEMÉE (G.). — 1959. Effet des caractères du sol sur la localisation de la végétation en zone équatoriale et tropicale humide. *Sois et végétation des régions tropicales, Colloque d'Abidjan, UNESCO*.
- LUTZ (J.) et CHANDLER (R.). — 1947. Forest Soils. *John Wiley and Sons, New-York*.
- MAHEUT (J.) et DOMMERGUES (Y.). — 1960. Les tockerales de Casamance. *Bois et Forêts des Tropiques*, 70, 25-42.
- METZ (L. J.). — 1952. Weight and nitrogen and calcium content of annual litter fall of forests in the South Carolina Piedmont. *Pro. Soil. Sci. Soc. Am.*, 16, 38-41.
- NYE (P. H.). — 1958. The relative importance of fallows and soils in storing plant nutrients in Ghana. *J. of the W. A. Sc. Ass.*, 1, 31-49.
- NYE (P. H.). — 1961. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant et Soil*, 13, 4, 333-346.
- ODUM (E. P.). — 1959. Fundamentals of ecology. *W. B. Saunders Company, Philadelphia*.
- TAMM (C. O.). — 1953. Growth, yield and nutrition in carpets of a forest moss (*Hypocomium splendens*). *Medd. Stat. Skogsforskn. Inst.*, 43, 1, 1-140.
- RENNIE (P. J.). — 1955. The uptake of nutrients by mature forest growth. *Plant and soil*, 7, 1, 49-55.
- SONN (S. W.). — 1954. Der Einfluss des Waldes auf die Böden, *Moscou* (traduction en français de P. Raynaud).
- WEBB (L. J.). — 1958. Note on the studies on rain forest vegetation in Australia. *Etude végét. Tropic.*, Paris, Unesco, 171-174.
- WILL (G. M.). — 1959. Nutrient return in litter and rain fall under some exotic conifer stands in New Zealand. *New Zealand J. Agr. Research*, 2, 719-724.

