

12 Le bilan hydrique et les sols

Le bilan hydrique

- La pluviosité
- La pénétration des pluies à travers le couvert
- L'écoulement le long des troncs
- L'interception
- L'évapotranspiration
- Le ruissellement et le drainage
- Les variations de la réserve en eau du sol
- Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Les sols

- Les propriétés physiques
 - Température du sol
 - Structure du sol
 - Porosité
 - Propriétés hydrodynamiques
- Les propriétés chimiques
 - Matière organique et azote
 - Autres propriétés
- Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

L'érosion

- Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Bibliographie sélective

Le bilan hydrique

Le bilan hydrique d'une surface couverte de végétation forestière peut être exprimé par les deux formules générales suivantes :

$$(1) \quad P = ETR + R + D \pm \Delta H$$

dans laquelle P , précipitations à découvert.
 ETR , évapotranspiration réelle
 R , eau de ruissellement
 D , eau d'infiltration
 ΔH , variations de la réserve en eau du sol;

$$(2) \quad P = P_{sol} + E_t + I$$

dans laquelle P , précipitations à découvert
 P_{sol} , précipitations à travers le couvert
 E_t , écoulement le long des troncs
 I , interception.

La pluviosité

La bonne connaissance des régimes pluviaux des zones tropicales humides est indéniable, ainsi que celle du caractère de grande variabilité des pluies d'une année à l'autre.

L'étude de l'Indonésie par Schmidt et Ferguson (1951) illustre bien l'usage qui peut en être fait. Ils ont établi une carte climatique de cette région en se fondant sur le rapport entre le nombre de mois secs et celui de mois humides au cours de l'année. Cela fournit une mesure des déficits hydriques en utilisant les plus simples stations météorologiques. Les aires ainsi délimitées montrent que les formations forestières sempervirentes sont associées aux climats qui ne présentent qu'un très petit nombre de mois secs. Whitmore (1975) a utilisé le même indice en Malaisie. Gaussen, Legris et Blasco (1967) ont étudié l'Indochine, la Thaïlande et la péninsule Malaise à l'aide de critères légèrement différents : ils ont compté le nombre de mois secs dans l'année en considérant comme tels ceux dont la pluviométrie en millimètres est inférieure à deux fois la température exprimée en degrés Celsius. Des études du même ordre ont été effectuées également en Afrique par Aubréville (1949), qui a considéré comme secs les mois recevant moins de 30 mm d'eau et très humides ceux qui reçoivent plus de 100 mm.

Par contre, ce type d'étude semble faire défaut en Amérique latine.

Mais lorsqu'il s'agit d'une étude à l'intérieur des éco-

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 17365

Cote : B

25 AVRIL 1985

systèmes forestiers tropicaux, c'est-à-dire sous le couvert végétal, on constate que les précipitations reçues sont mal connues du fait du très faible nombre de postes permanents de mesure. A titre d'exemples, il semble que l'ensemble Afrique-Madagascar ne possède qu'une seule station convenablement équipée (forêt de Périnet, Madagascar), et de rares autres partiellement équipées (Côte-d'Ivoire, Nigéria). Les stations de même ordre en Asie du Sud-Est sont sans doute aussi rares (Philippines, station de Pasoh en Malaisie). Cela est particulièrement vrai des forêts denses sempervirentes hyperhumides. Il convient cependant de signaler qu'en Guyane française trois stations ont fonctionné sous forêt : deux ont été exploitées par l'ORSTOM (Crique Virgile et Grégoire-forêt) et la troisième à Maripasoula-forêt par le Service météorologique national; à Crique Virgile, on disposait d'une tour d'observation débouchant à 30 m au niveau moyen de la cime des arbres et des mesures ont pu être effectuées simultanément près du sol et au sommet de la canopée. Un effort est à faire dans la mise au point d'appareils d'enregistrement automatique de longue durée, voire de télétransmission (radio ou satellite), capables de résister à l'ambiance chaude et humide.

Il faudrait d'autre part porter une attention soutenue au problème du nombre, de la localisation et de la représentativité des postes pluviométriques (clairières sous forêt). Lorsqu'on constate qu'on fait état, bien souvent, de ruissellements mesurés atteignant 70 et même 90 % des pluies, on ne peut que soupçonner une sous-estimation notable des précipitations. Il y a là un problème méthodologique qui ne se résoudra que par la définition de ce que doivent être les stations météorologiques à l'intérieur des forêts de la zone tropicale humide.

La pénétration des pluies à travers le couvert

Les connaissances dans ce domaine découlent plus de calculs que de mesures directes, à cause de lacunes méthodologiques. Elles permettent d'évaluer à 70 ou 80 % des précipitations annuelles la quantité d'eau qui atteint le sol par égouttement du feuillage. Ce pourcentage est indiqué, par déduction, par Mohr et Van Baren (1954) pour la forêt semi-caducifoliée d'Indonésie. Il se confirme par calcul en Afrique, où Malaisse (1973) constate la pénétration par égouttement dans le miombo zaïrois (forêt claire à *Brachystegia* et *Isobertinia*) de 890 et 1 148 mm sur les 1 105 et 1 463 mm tombés respectivement en 1973 et 1974. Il se confirme également en Inde, à Dehra Dun, où, en plantations de *Pinus roxburghii* et de *Tectona grandis*, on a mesuré respectivement des pénétrations de 69,7 et de 64,1 % des pluies annuelles (Dabral et Rao, 1968). A Pasoh enfin, en forêt dense sempervirente, 91 % des 2 000 à 2 400 mm de pluies annuelles pénètrent au travers du couvert. Il est probable, à la lumière des connaissances acquises sur le ruissellement le long des troncs, l'interception réalisée par le feuillage et l'évapotranspiration, que ces pourcentages serrent la réalité d'assez près. Ces estimations se fondent sur un très petit nombre d'études.

Il y aurait grand intérêt à réaliser des mesures directes du phénomène, comme dans le cas de la méthode récemment mise au point en Côte-d'Ivoire (Huttel, dans

Bernhard-Reversat, Huttel et Lemée, 1975). Les précipitations sont recueillies par des auges rectangulaires de 500 cm² de surface collectrice et de profil évitant les pertes par éclaboussures. Ces pluviomètres sont placés à 50 cm au-dessus du sol et les eaux sont collectées dans des bidons de 25 litres. La précision de la mesure hebdomadaire approche le 1/10 de mm de pluie. Le nombre de pluviomètres placés dans la forêt du Banco a été porté de 3 à 12 puis à 24, car ce n'est qu'à partir de 12 pluviomètres que la précision obtenue sur la moyenne est de 10 %, lorsque les précipitations dépassent des hauteurs de 5 mm. La répartition se fait au hasard pour permettre une analyse statistique des résultats.

Dans le cas d'une plantation d'hévéas de 6 ans et demi, Teoh (*in Anon.*, 1974) a montré par ailleurs, à la station malaisienne de Pasoh, que le pourcentage moyen de pénétration mensuelle de la pluie décroît avec l'accroissement de la densité des arbres, tandis que croît le pourcentage moyen d'écoulement mensuel le long des troncs.

L'écoulement le long des troncs

Cet écoulement a été mesuré pendant plus d'une année dans la forêt sempervirente dense du Banco en Côte-d'Ivoire (Huttel, 1962) sur une parcelle de 300 m² portant 16 arbres, tous munis d'une gouttière en plastique enroulée en spirale à la base du tronc. Il s'est révélé faible : moins de 1 % des précipitations pénétrant sous forêt. Sollings et Drewry (1970) ont obtenu le même résultat à Porto Rico, en comparant les volumes recueillis par la frondaison d'arbres isolés et les ruissellements consécutifs le long des troncs; Nye (1961) au Ghana, dans une forêt sempervirente semi-caducifoliée et Malaisse (1973) au Zaïre, dans une forêt claire (miombo), ont respectivement trouvé les valeurs de 1 % et 0,4-1,4 %. Chunkao enfin (*in Anon.*, 1974) signale une valeur de 0,5 % pour la forêt dense sempervirente de Pasoh. Par contre des valeurs sensiblement supérieures ont été recueillies au Brésil (Freise, 1936), 28 %; et à Porto Rico, une nouvelle fois, mais sous un ensemble de 27 arbres (Kline, Jordan et Drewry, 1968), 18 %. Des valeurs intermédiaires sont signalées par Dabral et Rao en Inde : 3,3 et 7,1 % sous *Pinus roxburghii* et *Tectona grandis* (1968), et 7,2 % sous *Shorea robusta* (1969).

La contradiction révélée par ces résultats conduit à estimer nécessaire la poursuite des mesures, mais par des méthodes normalisées car, étant donné la délicatesse des expérimentations, il est probable que la diversité des méthodes employées doit constituer la principale cause des écarts constatés (en particulier, nombre et éloignement des arbres entre eux). Il conviendrait en outre de prendre en considération certains facteurs susceptibles d'influencer le phénomène comme, par exemple, la hauteur et l'intensité des pluies, et l'effet du vent sur l'angle de chute des précipitations atmosphériques. Dans une étude toute préliminaire Dabral (1967) signale que, pour une même hauteur d'eau tombée, l'écoulement décroît avec l'accroissement de la durée de la pluie sur plantation de *Tectona grandis*, ce qui révèle l'influence de l'intensité pluviale.

L'interception

Il s'agit de la quantité d'eau arrêtée par la végétation, c'est-à-dire celle qui n'atteint pas le sol ou ne ruisselle pas le long des troncs.

Les taux d'interception de forêts tropicales et subtropicales actuellement connus de par le monde sont également fort variables : 3 % au Nigéria (Hopkins, 1965); 5 % au Costa-Rica (McCull, 1970); 8 % en Malaisie (Chunkao, *in* Anon., 1974); 12 % en Côte-d'Ivoire en forêt tropicale humide (Huttel, 1962); 12 à 26 % à Porto Rico (Kline, Jordan et Drewry, 1968); 18 à 20 % au Zaïre en forêt claire (Malaisse, 1973); 31 % à l'île Maurice (Vaughan et Wiehe, 1947); 35 % en Ouganda (Hopkins, 1960); 38 % en Inde, en plantation de *Shorea robusta* vieille de 37 ans (Dabral et Rao, 1969) et même 65-70 % au Brésil en forêt subtropicale (Freise, 1936). Ils représentent des moyennes calculées sur des durées plus ou moins longues et dérivent de comparaisons entre précipitations sous couvert et précipitations aux postes météorologiques à découvert les plus proches des lieux d'étude. Cette variation n'est pas étonnante puisque l'interception des pluies est, entre autres choses, fonction des caractéristiques du peuplement, comme l'indiquent Czarnowski et Olzewski (1968) en proposant la formule suivante :

$$I = f(H\sqrt{SN})$$

dans laquelle I , l'interception, est fonction de
 H , hauteur du peuplement
 S , aire basale du peuplement (surface terrière)
 N , densité du peuplement.

Il semble cependant que les recherches, dans ce domaine, ne soient pas assez poussées. La variabilité des pluies dans l'espace devrait faire l'objet d'une attention plus soutenue quand on applique les méthodes comparatives indiquées ci-dessus. Mais surtout, il faudrait s'attacher à des études plus fines comme celle de l'effet de la durée et de l'intensité des pluies sur l'interception (Malaisse, 1973; d'après ses premiers résultats obtenus au Zaïre, soupçonne leur importance) et celle de l'interception réalisée par le sous-bois et la strate herbacée.

L'évapotranspiration

Les mesures directes de l'évapotranspiration réelle (ETR) étant très délicates; il a été le plus souvent fait appel à l'évapotranspiration potentielle pour son évaluation en période d'humidité, quand $P > ETP$, car alors ETP et ETR sont très semblables; en période d'assèchement, on passe par le biais de l'évaluation des réserves en eau utile du sol ou de la différence entre les précipitations (P) et le stock d'eau du sol pendant une période donnée.

C'est ainsi qu'ont été évaluées les évapotranspirations réelles annuelles d'un certain nombre de forêts tropicales et subtropicales.

Forêt sempervirente dense du Banco (Côte-d'Ivoire) : environ 1 150 mm (Huttel, 1962).

Forêt sempervirente semi-caducifoliée de Yapo (Côte-d'Ivoire) : 1 168 mm (Huttel, 1962).

Forêt claire du miombo zaïrois (Zaïre) : 1 050 mm (Malaisse, 1973).

Forêt claire du Nord-Est thaïlandais (Thaïlande) : 948 mm (Sabhasri *et al.*, 1970).

Plantation d'*Eucalyptus* (Bengale) : 1 136 mm (Banerjee, 1972).

Il est intéressant de constater que ces valeurs confirment une mesure directe de transpiration des feuilles, branches et sous-bois d'une forêt tropicale de montagne, jointe à une estimation d'évaporation du sol, faite à Java (Coster, 1937) : 870 et 200 mm respectivement, c'est-à-dire 1 070 mm d'évapotranspiration annuelle.

Il convient enfin de signaler l'emploi fréquent de formules pour évaluer l'évapotranspiration potentielle, Thornthwaite (1948), Mohr et Van Baren (1954), Turc (1961), entre autres. Si l'on peut s'interroger sur leur degré de véracité, du moins expriment-elles bien la variation du phénomène à l'échelle d'une région, mais nécessitent des ajustements d'une région à une autre.

Peu nombreux sont les pays tropicaux poursuivant des études d'évapotranspiration sous forêt : Indonésie, Thaïlande, Malaisie en Asie du Sud-Est; Côte-d'Ivoire, Zaïre en Afrique. C'est dire combien l'extension géographique de telles études est nécessaire, d'autant plus qu'elles devraient porter sur différents types de forêts.

Les recherches nécessaires sur la transpiration des végétaux imposent une mise au point méthodologique approfondie (type d'appareils, techniques de mesure, interprétation des résultats). Étant donné d'autre part l'importance du phénomène pour la vie des plantes, un réseau de mesure de l'évaporation devrait toujours être combiné au réseau de stations météorologiques.

Le ruissellement et le drainage

C'est probablement l'un des termes du bilan hydrique dans les formations forestières à propos duquel les connaissances sont le moins développées et le moins précises. Très rares sont les études comme celle de Ruangpanit (1971, Thaïlande) qui a démontré la diminution du ruissellement en fonction de l'augmentation de la surface couverte par le feuillage, en mettant en lumière l'importance de la valeur critique de 60-70 % de couverture végétale et également le rôle de l'intensité et de la durée des précipitations sur le volume d'eau ruisselé sous forêt (tableau 1).

Le ruissellement sous forêt a été souvent évalué par les spécialistes à partir des cours d'eau. Ces estimations pourraient faire penser qu'il est élevé en zone tropicale humide. Cela est particulièrement vrai dans les régions très pluvieuses, où les précipitations annuelles dépassent 2 500 mm, car le coefficient d'écoulement des cours d'eau oscille alors autour de 50 à 70 %. Pour une précipitation moyenne annuelle de 2 427 mm, calculée sur 4 ans à Dehra Dun, en Inde, Rao, Dabral et Ramola (1973) indiquent un ruissellement de 41 % des pluies sous *Shorea robusta*.

Cependant, dans une grande partie des forêts de basse altitude moins arrosées (1 600 à 2 200 mm), les écoulements

TABLEAU 1. Relations entre le pourcentage de couverture de la frondaison et les ruissellements enregistrés en trois classes d'intensité et de durée pluviale.

| Pourcentage de couverture de la frondaison | Ruissellements (m ³ /ha) pour 3 classes d'intensité pluviale | | |
|--|---|------------|-----------|
| | 0-10 mm/h | 10-20 mm/h | > 20 mm/h |
| 20-30 | 3,1 | 6,5 | 8,0 |
| 50-60 | 2,7 | 6,5 | 7,8 |
| 60-70 | 1,7 | 4,1 | 5,1 |
| 80-90 | 1,4 | 3,6 | 5,1 |

| Pourcentage de couverture de la frondaison | Ruissellements (m ³ /ha) pour 3 classes de durée pluviale | | |
|--|--|------------|-----------|
| | 0-60 min | 60-180 min | > 180 min |
| 20-30 | 2,6 | 4,7 | 7,4 |
| 50-60 | 2,6 | 4,6 | 6,4 |
| 60-70 | 1,4 | 2,7 | 4,4 |
| 80-90 | 1,4 | 2,3 | 4,3 |

annuels dépassent rarement 50 % des apports pluviaux et peuvent même s'abaisser à 10 à 30 % comme l'indique le Service hydrologique de l'ORSTOM pour l'Afrique. A Madagascar, sur des bassins d'une superficie d'environ 15 ha, à la station forestière de Périnet (1 800 mm/an), Bailly *et al.* (1974) ont relevé des coefficients d'écoulement annuel voisins de 36 % sous forêt naturelle, 20 % sous reboisement d'*Eucalyptus* et 56 % sous forêt dégradée en cours de reconstitution (forêt secondaire). Sur des bassins de l'ordre de 1 km², les coefficients d'écoulement annuel mesurés ont été de 43 % sous forêt naturelle et de 58 % sous forêt secondaire.

Mais, par ailleurs, Roose (1967) a étudié à Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire) le ruissellement direct sous couvert forestier en diverses pentes, à l'aide de parcelles d'un type nouveau mises au point par lui-même; il estime que celui-ci ne dépasse pas 1 %, ce qui laisse à penser que l'eau parvient aux rivières surtout par drainage interne, vertical ou oblique. L'importance de ces mouvements est également soulignée par Douglas (1971) en Malaisie, près de Kuala-Lumpur. Sur de très petits bassins (1,5 à 2 ha) les chercheurs du Centre technique forestier tropical (Bailly *et al.*, 1974) ont observé à Madagascar que la forêt secondaire ne laissait passer qu'un ruissellement de surface minime (3 % de la pluviosité annuelle sur 9 ans) considérablement plus faible que dans le cas des terrains défrichés.

Si l'on considère alors ce dernier point, on constate que l'exploration du régime hydrique des sols sous forêt en zone intertropicale s'est limitée généralement à la rhizosphère. Sauf de rares exceptions (Roose en Côte-d'Ivoire), on a peu étudié la totalité d'un profil. La mise au point de l'humidimètre à neutrons n'a pas modifié cette situation. Celle-ci n'est pas due non plus à une méconnaissance du rôle de l'eau comme agent principal de la pédogenèse puisqu'on la prend en considération aussi bien pour étudier l'hydrolyse que les solutions du sol, par exemple. Il semble,

en réalité, qu'on ait préféré déduire l'histoire hydrique du sol des déplacements de matières qui résultent du mouvement de l'eau.

Le comportement du complexe sol-forêt reste encore mal compris. Il faudrait, pour remédier à cette lacune, tenir compte du rôle composite du sol. L'absence ou la rareté d'une litière végétale fait que ses horizons superficiels jouent un rôle primordial dans le partage entre ruissellement et infiltration. Les sols exercent leur action plus par l'intermédiaire de la structure que de la granulométrie, étant donné la nature kaolinitique des argiles et leur faible capacité de rétention d'eau. Cela est bien ressenti mais ne fait pas encore l'objet de démonstrations probantes. Une très récente comparaison entre les données obtenues en parcelles expérimentales identiques par Roose (1967), en Côte-d'Ivoire, et Blancanneaux (1974), en Guyane française, est significative à cet égard. En effet l'une des raisons pour lesquelles le ruissellement annuel de surface égal à 1 % des précipitations dans le cas de la Côte-d'Ivoire est remplacé par un ruissellement de 56 % en Guyane française réside dans la nature de l'horizon B des sols forestiers guyanais, qui est de structure massive, compacte et imperméable. Une analyse fine de l'organisation interne du matériau devrait permettre d'apporter des éclaircissements sur cette question. Une action conjointe entre spécialistes d'hydrologie et de physique du sol s'impose en ce cas.

Les variations de la réserve en eau du sol

Elles sont surtout le fait de physiciens du sol et de géographes qui voulaient comparer la dynamique de l'eau dans des sols de savanes et de forêts. L'une des plus récentes études à ce sujet a été effectuée en Côte-d'Ivoire (forêts du Banco et de Yapou) à l'aide d'humidimètres à neutrons. Huttel (1962) insiste sur l'effet de la granulométrie sur le phénomène. En cas de texture homogène, l'amplitude de la variation de la teneur en eau du profil décroît régulièrement en profondeur; elle est plus forte dans l'horizon où s'exerce l'activité des racines. Si les horizons inférieurs sont argileux, cette décroissance s'estompe. Si les horizons supérieurs deviennent très grossiers (gravillonnaires par exemple), ils peuvent céder beaucoup plus d'eau que les horizons inférieurs.

Avenard (1971) constate, d'une manière générale, que les processus de changement d'humidité sont plus lents sous forêt que sous savane et progressent de haut en bas, car l'enracinement ralentit l'infiltration et l'eau ne pénètre en profondeur qu'après le dépassement de la capacité de rétention en surface.

Les lacunes dans nos connaissances sont identiques à celles signalées à propos du ruissellement et du drainage. Il serait très souhaitable que des physiciens du sol se consacrent à une étude approfondie de cette question à propos de laquelle existent des informations, mais beaucoup trop dispersées et noyées dans des rapports scientifiques où elles servent de témoins (très fragmentaires) à des recherches plus poussées sur le milieu cultivé.

Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Lorsqu'on reprend l'ensemble du bilan hydrique des écosystèmes forestiers tropicaux, une conclusion s'impose : il manque encore à l'heure actuelle, pour asseoir solidement les connaissances à ce sujet, des études complètes et cohérentes de la dynamique hydrique sous divers types de forêt et sous différents régimes climatiques, pour fournir à ceux qui étudient les milieux cultivés les références aux milieux originels qui permettront de confronter l'état actuel créé à l'équilibre dynamique initial.

Pour cela s'impose un programme de recherche dont les points prioritaires sont les suivants.

1. Accroître partout le nombre et la densité des stations de mesures hydropluviométriques à l'intérieur des écosystèmes forestiers tropicaux. Pour cela un effort méthodologique considérable reste à faire :

Mise au point d'appareils d'enregistrement automatique et de télétransmission adaptés au climat pour mesurer la pluie;

Définition de méthodes et d'appareils pour mesurer directement la pénétration des pluies à travers le couvert, l'écoulement le long des troncs et l'interception par le couvert végétal. Cela suppose une étude précise de la localisation des appareils.

2. Lancer de nouvelles recherches sur l'évapotranspiration en multipliant :
 - Les stations de mesure de l'évaporation du sol;
 - Les mesures de transpiration des végétaux, qui nécessitent une mise au point méthodologique. Dans ce domaine, il semble que l'Afrique et l'Asie du Sud-Est aient déjà accompli quelques progrès qui manquent à l'Amérique latine.
3. Étudier le ruissellement sous forêt et le drainage interne du sol grâce à des parcelles expérimentales du type de celles mises au point par Roose à la Station ORSTOM d'Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire, parcelles ERLO). Il ne semble pas qu'elles existent en dehors de l'Afrique de l'Ouest francophone et cela constitue une grande lacune à combler.
4. Multiplier partout les études de réserve en eau du sol grâce aux humidimètres à neutrons maintenant disponibles.

Les sols

Une première propriété importante des sols tropicaux concerne le degré très poussé d'altération de leurs roches mères (Aubert, 1965). Cela découle en grande partie de la vitesse rapide de décomposition des roches, due à l'élévation de la chaleur et de l'humidité pendant de longues périodes. Placés à l'écart des glaciations du Quaternaire et lorsqu'ils ont été protégés par la forêt, donc lorsque les matériaux altérés sont restés sur place, les sols se sont développés sur une grande profondeur.

Ils possèdent une réserve minérale faible et la kaolinite prédomine largement dans leur fraction argileuse, d'où une faible capacité d'adsorption des cations. Ils sont

riches en silice et en oxydes de fer libre, et la plupart d'entre eux contiennent également des quantités d'alumine libre parfois dominantes. Ils sont généralement acides et pauvres en éléments nutritifs majeurs. Cependant la présence de la forêt modifie cette dernière caractéristique, car les cycles biogéochimiques enrichissent alors l'horizon supérieur des sols en matière organique et en bases par décomposition des débris végétaux et de la litière.

Les sols sont enfin généralement bien drainés et leur structure entraîne une bonne aération. Ils présentent une sensibilité particulière au lessivage lorsque la forêt disparaît.

Les pédologues des différents continents les ont appelés de différents noms : latosols, sols ferrallitiques, kaolisols, oxisols, inceptisols.

Tous les sols tropicaux ne se sont pas seulement développés sur de vieux paysages; les bas fonds et les montagnes sont des sources de différenciation. Lorsqu'on s'éloigne d'autre part de l'équateur, l'apparition de saisons sèches plus ou moins longues change les conditions de la pédogenèse et de l'évolution. Dans ce dernier cas des structures défavorables peuvent survenir en saison sèche, le processus d'érosion peut se déclencher plus facilement. Les oxydes de fer dominent largement. Ils ont été dénommés sols ferrugineux tropicaux, sols ferrallitiques lessivés, red yellow podzolics, ultisols ou gray podzolics. Ils ont été moins pris en considération dans ce chapitre concernant les sols des forêts plutôt que ceux des savanes, donc ceux de la première série indiquée ci-dessus dont les principales caractéristiques physiques et chimiques sont passées en revue.

Les propriétés physiques

Température du sol

La température du sol sous forêt, dans les régions tropicales humides, s'abaisse en saison chaude et s'élève en saison moins chaude par rapport à la température extérieure. Les amplitudes thermiques comme les fluctuations saisonnières sont réduites. Cela se manifeste surtout dans les 30 premiers centimètres du sol, comme l'indique Kittredge (1962) et le confirment des observations faites à Dehra Dun, en Inde, sous forêt humide caducifoliée.

Structure du sol

Les sols des régions tropicales humides ne posent des problèmes de structure qu'en cas de la disparition de la végétation forestière ou de savane qui les protège des phénomènes brutaux et alternés de dessiccation, provoqués par de hautes températures, et d'humidification, dus aux pluies intenses. En réalité, leur structure est généralement bonne sous forêt et maintient un bon niveau d'infiltration; ce fait est signalé dans tous les continents.

Mais c'est surtout d'Afrique, tant anglophone (Pereira, 1954, 1956) que francophone (Hénin *et al.*, 1958; Monnier, 1965, entre autres) et des îles du Pacifique, des îles Hawaï en particulier (Uehara *et al.*, 1962; Cagauan et Uehara, 1965) que proviennent les sources essentielles de caractérisation de la structure des sols des tropiques humides.

Uehara *et al.*, ont relié la formation des agrégats stables des oxisols, ultisols et inceptisols à la nature et à l'arrangement des minéraux : présence d'argiles de type 1:1, principalement de kaolinite et d'hallowysite, et d'oxydes de fer et d'alumine, hydratés et non hydratés, concentrés dans la fraction minérale inférieure à 2 μ et présents sous forme de *coatings*. Les chercheurs français (Combeau et Quantin, 1963) insistent d'autre part sur le rôle bénéfique, maintenant mieux connu, des diverses fractions de la matière organique dans la stabilité de la structure. Il en résulte des structures grumeleuses à cohésion forte dans les horizons supérieurs des sols sous forêt. Celles-ci sont également signalées dans les autres parties tropicales du monde, placées dans des situations identiques mais sans explications précises de leur existence.

Les écoles pédologiques française et anglaise, du fait de leurs travaux sur le continent africain, ont fourni les principales méthodes employées pour caractériser la structure. Les seules mesures de stabilité des agrégats à l'eau s'étant révélées peu appropriées, Pereira a mis au point un test de réaction à des chutes de gouttes d'eau pour évaluer la structure. Les pédologues français utilisent, quant à eux, le coefficient d'instabilité d'Hénin *et al.* (1958), exprimé par :

$$S = \frac{A + L}{A_{\text{air}} + A_{\text{alcool}} + A_{\text{benzène}}}$$

dans lequel : $A + L$, pourcentage d'argile et de limon
 A_{air} , pourcentage d'agrégats stables à l'eau sans prétraitement
 A_{alcool} , pourcentage d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool
 $A_{\text{benzène}}$, pourcentage d'agrégats stables après prétraitement au benzène.

S varie de 0,1 à 100 et la stabilité est grande pour les valeurs inférieures à 1. Il est commun et significatif d'enregistrer sous forêt des valeurs comprises entre 0,3 et 0,7 pour les horizons supérieurs des sols.

Porosité

L'une des toutes premières mesures de porosité d'un sol tropical n'ayant pas subi de modifications anthropiques profondes remonte à 1933 (Roberts) et portait sur un sol latéritique assimilé maintenant à un oxisol. Sa porosité totale était égale à 57 % dans les 12 premiers centimètres du profil et à 47 % entre 75 et 150 cm de profondeur; elle entraînait donc une perméabilité jugée satisfaisante. Ce jugement s'est trouvé vérifié et même précisé par des mesures plus récentes faites aux îles Hawaï (Baver et Trowse, 1965) et d'autres, tout à fait contemporaines, effectuées en Thaïlande (Ruangpanit, 1971). (Voir le tableau 2.)

Non seulement les oxisols possèdent une bonne perméabilité mais celle des inceptisols des régions tropicales (Tropepts) est encore supérieure. L'horizon dense, présent en profondeur dans les ultisols et dans certains sols ferrallitiques, annihile cette propriété favorable des sols des

TABLEAU 2. Densité apparente et porosité totale de sols forestiers sous les tropiques humides

| Sols | Densité apparente (g/cm ³) | | Porosité totale (%) | |
|--|--|--------------|---------------------|--------------|
| | Surface | Pro-fon-deur | Surface | Pro-fon-deur |
| Hawaï | | | | |
| Oxisols (Low humic latosols) | 1,1 | 1,2 | 62 | 59 |
| Inceptisols (Humic latosols) | 0,8 | 0,8 | 70 | 70 |
| Inceptisols (Hydrohumic latosols) | 0,5 | 0,2 | 82 | 93 |
| Ultisols (Humic ferruginous latosols) | 1,2 | 2 | 60 | |
| Thaïlande | | | | |
| Sol sous forêt humide | 0,48 | 0,67 | | |

forêts tropicales humides et restreint le développement des racines.

Sous les forêts plus sèches de Thaïlande ou de type subtropical du Japon, la porosité diminue : les sols des premières (Chunkao, *in* Anon., 1974) ont des densités apparentes variant entre 1,37 et 1,80 g/cm³ et ceux des secondes présentent des porosités totales de l'ordre de 50 à 55 % au travers du profil (île d'Okinawa).

La bonne perméabilité des sols forestiers en zone tropicale humide est à rapprocher de la présence, dans les différents horizons, d'un grand nombre de micropores ayant la propriété de ne pas se colmater par gonflement quand le profil s'humidifie. Cela est signalé aussi bien par Roberts (1933) que pour les sols de Porto Rico (Smith et Cernuda, 1952) ou du Brésil (Grohmann et Conagin, 1960).

Enfin les analyses faites aussi bien à Porto Rico qu'en Amérique du Sud et en Afrique font toutes ressortir la grande stabilité des agrégats dans les horizons de surface des sols. A Porto Rico, elle est 10 à 500 fois supérieure à celle des agrégats des horizons inférieurs (Smith et Cernuda, 1952; Lugo-Lopez et Juarez, 1959). On attribue ce fait, en Amérique du Sud (Molina et de Giuffrè, 1961) à la présence des colloïdes organiques nés de la décomposition aérobie de la cellulose. C'est de la matière organique également que dépend la stabilité des agrégats des sols forestiers d'Afrique (Boyer et Combeau, 1960) par création d'un complexe argilo-humique, les deux éléments se protégeant mutuellement.

Propriétés hydrodynamiques

Elles ont été traitées à propos du bilan hydrique (ruissellement et drainage). Il faut souligner les taux élevés de percolation résultant d'une structure favorable. La perméabilité moyenne des sols ferrallitiques en Afrique s'élève à 14 cm/h en surface et reste encore de 6,5 cm/h en profondeur. Bonnet (1968) signale à Porto Rico des vitesses d'infiltration dans l'horizon supérieur des inceptisols, des

oxisols et des ultisols s'élevant respectivement à 13,3, 15,4 et 23,7 cm/h. La disparition de la forêt et la mise en culture des sols entraînent en 2 ou 3 ans à peine un abaissement notable de ces valeurs (on signale des cas où elles tombent en dessous de 3 à 4 cm/h) par dispersion de l'argile et diminution de la porosité, surtout de la macroporosité (Boyer et Combeau, 1960).

Mais il convient en outre de compléter ici, sous l'angle du sol, le tableau des connaissances acquises, en soulignant le rôle de l'hydromorphie et d'autre part de la texture (en tant que facteur de la rétention d'eau) sur la répartition des groupements forestiers tropicaux humides.

En effet, souvent pour des raisons géomorphologiques, la forêt dense sempervirente et la forêt sempervirente semi-caducifoliée revêtent une physionomie particulière dans les secteurs très hydromorphes. Lebrun et Gilbert (1954) ont mis en évidence ce fait en distinguant au Zaïre : a) des forêts marécageuses sur sols gorgés d'eau, comme la forêt

à *Symphonia globulifera* et à *Mitragyna ciliata*; b) des forêts riveraines dans les régions où les nappes présentent d'importantes variations; c) des forêts périodiquement inondées et d) des forêts de vallées subissant des crues de courte durée et occasionnelles. La forêt à *Mora excelsa* décrite par Davis et Richards en Guyana (in Lemée, 1961) appartiendrait au groupe c, et celle à *Eugenia heyneana* et *Terminalia glabra*, indiquée par Misra (in Lemée, 1961) dans la vallée du Gange, aux groupes d et b qui viennent d'être indiqués.

En ce qui concerne le rôle de la texture, si certains pays signalent la difficulté, pour eux, de relier les formations végétales aux sols dans les régions bien drainées, les recherches de certains spécialistes ont permis, dès 1959, d'établir le tableau 3, qui ne doit pas étonner puisqu'on sait que la réserve d'eau disponible pour la croissance des végétaux est d'autant plus faible que les sols sont sableux et d'autant plus élevée que les sols sont argileux.

TABLEAU 3. Répartition de quelques types forestiers en relation avec la texture du sol (in Lemée, 1961)

| | Sable blanc pur | Sables colorés | Sols sablo-limoneux | Sols argileux |
|--|--|--|---|-------------------------------------|
| Guyana (Davis et Richards) | Forêt à <i>Eperua falcata</i> (Wallaba forest) | Forêt à <i>Ocotea radiata</i> | Forêt mixte à <i>Eschweilera-Licania</i> | Forêt à <i>Mora gonggrijpii</i> |
| Amazonie, territoire d'Amapa (Aubréville) | Forêt basse à <i>Humiria</i> | — | Forêt à <i>Dinizia excelsa</i> | — |
| Côte-d'Ivoire (Mangenot) | — | Turraeantho- Heisterietum | Diospyro- Mapanietum | — |
| Bornéo (Kostermans) | Forêt à <i>Shorea longifolia</i> | Forêt à <i>Koompassia malaccensis</i> | Forêt à <i>Koompassia excelsa</i> | — |
| Sarawak (Richards) | « Heath forest » à <i>Agathis</i> | — | — | Forêt mixte à Diptérocarpacées |
| Viet Nam central (Schmid) | — | — | Forêt à Diptérocarpacées | Forêt à Méliacées et Sapindacées |

Les propriétés chimiques

Matière organique et azote

Les auteurs sont unanimes à reconnaître que la teneur en matière organique des sols forestiers de la zone inter-tropicale est élevée. Bartholomew (1972) l'indique dans son chapitre de l'étude générale sur les *Sols des tropiques humides* aussi bien que Charreau et Fauck (1970), Babalola et Cheheda (1972) pour l'Afrique; Hardon (1936) pour l'Indonésie; Khemnark *et al.* (1972) pour la Thaïlande; ainsi que Bayer (1970) pour les îles Hawaï. Cette teneur est d'autant plus forte lorsqu'on passe des forêts sèches et semi-caducifoliées aux forêts sempervirentes, comme le montrent clairement Khemnark *et al.* (1972). (Voir tableau 4.)

Cette matière organique est en général bien évoluée : son rapport C/N est voisin de 12.

Dans certaines conditions, principalement en condition d'hydromorphie, l'accumulation de matières organiques mal décomposées conduit à l'apparition de sols tourbeux. D'autre part, en conditions de bon drainage, de fort les-

TABLEAU 4. Teneurs de l'horizon supérieur du sol (0-15 cm) en matière organique (pourcentage de matière sèche) sous différentes forêts de Thaïlande (Khemnark *et al.*, 1972)

| Type de forêt. | Pourcentage de matière sèche |
|--|------------------------------|
| Forêt sempervirente d'altitude | 11 |
| Forêt sempervirente de plaine | 9,5 |
| Forêt semi-caducifoliée à teck | 7,3 |
| Forêt sèche à <i>Dipterocarpus</i> | 5,7 |
| Forêt sèche à <i>Dipterocarpus</i> et pins | 3,7 |

sivage et de pédogenèse sur roches acides, la formation d'une matière organique beaucoup moins évoluée entraîne l'apparition de podzols, fréquents en Amérique latine (Amazonie, Guyane) et en Extrême-Orient.

Les spécialistes sont tout autant unanimes à reconnaître, dans tous les continents, que la haute teneur signalée ci-dessus diminue considérablement après un défrichement et une mise en culture. Charreau et Fauck (1970) indiquent des pertes de 20 à 35 % dès la première année

d'exploitation en Afrique. Babalola et Cheheda (1972) constatent même 63 % de pertes après plusieurs années.

Hardon, dès 1936, signalait d'autre part deux faits maintenant bien connus : l'abaissement du rapport C/N dans les horizons inférieurs du sol ainsi que son indifférence, à ce niveau, à l'égard du type de végétation; l'augmentation de C/N aussi bien dans les horizons supérieurs qu'inférieurs du sol avec l'altitude, particulièrement au-dessus de 500 m, principalement due à l'élévation du pourcentage en carbone (passage de 9,4 à 21,7 % sous forêt primaire en Indonésie).

Les changements de la teneur en matière organique s'accompagnent toujours de changements parallèles de teneur en azote organique, qui constitue la forme largement dominante de l'azote dans le sol. Bartholomew (1972) estime que certains sols tropicaux sous forêt primaire (ou secondaire depuis très longtemps) accumulent dans leur horizon humifère 10 000 kg d'azote/ha, qui deviennent disponibles à raison de 400 kg/ha/an (Schreiner et Brown, 1938) en cas d'exploitation. Ahn (1959) confirme ce fait en signalant des teneurs en azote de 9 000 et 8 000 kg/ha respectivement sous forêt semi-caducifoliée et sous forêt sempervirente au Ghana, dans les premiers 90 cm du sol. Tout cela signifie qu'après une longue période de culture, l'azote organique du sol n'est plus une source d'azote disponible et que, sur le plan des processus naturels, il ne faudrait plus compter que sur l'azote atmosphérique et celui de la fixation non biologique.

Autres propriétés

On sait enfin, depuis une vingtaine d'années, que les sols tropicaux sont insuffisamment fournis en soufre. Mais assez récemment, Dabin (1970) a démontré en Afrique la nature organique des réserves en soufre et la rareté des carences en cet élément sous forêt.

Les recherches approfondies effectuées tant en zone tempérée qu'en zone tropicale ont démontré la diminution de la teneur du sol en phosphore total lorsque l'intensité de l'altération augmente. Cette teneur passe de 3 000 ppm sous climat frais subhumide à 500 ppm sous les climats chauds et humides de la zone tempérée (Pierre et Norman, 1953) et à moins de 200 ppm dans les sols des tropiques humides très anciens et très évolués (Nye et Bertheux, 1957; Bouyer et Damour, 1964; Enwezor et Moore, 1966). Ce phénomène est connu en Afrique, où Ahn (1959) a mesuré 139 ppm de phosphore total dans les 5 premiers centimètres d'un sol de forêt dense sempervirente et 290 ppm dans ceux d'un sol sous forêt sempervirente semi-caducifoliée. Cette faiblesse se retrouve en Asie du Sud-Est, où l'on enregistre en Thaïlande seulement 43 ppm de phosphore assimilable sous forêt dense sempervirente et 36 ppm sous forêt sempervirente semi-caducifoliée (Khemnark *et al.*, 1972). Parallèlement, on a reconnu que cette décroissance s'accompagne d'une augmentation relative du phosphore organique dans certains sols (latosols, oxisols et podzols en particulier).

Le recyclage des bases par la végétation forestière constitue une importante caractéristique des sols des tro-

piques humides situés sous forêt. Lorsque les précipitations annuelles ne sont pas trop élevées (moins de 1 700 mm), les horizons de surface sont relativement enrichis en bases en raison des cycles biogéochimiques (Aubert et Tavernier, 1972). Quand la pluviométrie annuelle est importante (plus de 1 700 mm) cet enrichissement devient moins prononcé.

Mais c'est surtout après la déforestation et la mise en valeur agricole que le milieu créé laisse plus librement cours à la lixiviation et que la teneur en bases diminue nettement et parfois même rapidement. De là proviennent la faiblesse de cette teneur signalée en général par les agronomes; et par suite le développement de très nombreux travaux qui ont abouti maintenant à des connaissances relativement bonnes sur les teneurs minimales, et parfois optimales, en potassium échangeable pour les cultures, les conditions d'emploi d'engrais potassiques et les seuils de carence et de déficience en magnésium. L'expérience reste encore très incomplète à propos du calcium et des équilibres potassium-calcium-magnésium dans le sol.

Les sols sous forêt des régions tropicales humides sont souvent acides en profondeur (pH de l'ordre de 5,5, s'abaissant parfois à 4 dans des sols très évolués) mais présentent un pH un peu supérieur (\neq 6) en surface en raison de la libération des bases lors de la décomposition de la matière organique. Le tableau 5 fournit quelques exemples de pH en surface et en profondeur dans des sols sous forêt en Afrique et en Asie du Sud-Est.

TABLEAU 5. pH de sols des régions tropicales humides sous forêt (surface et profondeur)

| | pH en surface | pH en profondeur |
|---|---------------|------------------|
| Thaïlande (Khemnark <i>et al.</i> , 1972) | | |
| Forêt dense sempervirente | 5,7 | 5,4 (à 30 cm) |
| Forêt semi-caducifoliée à teck | 6,7 | 5,8 (à 30 cm) |
| Forêt claire | 6,2 | 5,7 (à 30 cm) |
| Côte-d'Ivoire (Aubert, 1959) | | |
| Forêt dense sempervirente | 6,1 | 5,5 (à 50 cm) |
| Madagascar (Aubert, 1959) | | |
| Forêt sempervirente semi-caducifoliée | 6,1 | 5,7 (à 40 cm) |

Le développement de l'agriculture dans les régions tropicales humides a fait porter attention non seulement aux éléments majeurs nécessaires aux plantes cultivées, mais également aux oligo-éléments qui entrent dans la nutrition. De ce fait, on trouve dans tous les continents une abondante littérature sur le manganèse, le bore, le cuivre, le zinc, le molybdène, le chlore, etc. Mais celle-ci ne traite que de sols cultivés. Il semble qu'on ne sache à peu près rien dans ce domaine, à propos des sols strictement forestiers.

Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Lorsque l'on considère les études pédologiques effectuées dans les régions tropicales humides, force est de constater que, dans leur immense majorité, elles portent sur les sols cultivés et négligent presque complètement les sols sous forêt dont les premiers dérivent. Pourtant, l'un des problèmes les plus fondamentaux de la pédologie tropicale est la transformation radicale des propriétés physiques et chimiques du sol lorsque ceux-ci sont déforestés et mis en culture. La mesure de l'évolution des sols dans les régions tropicales humides et les prises de décision pour préserver les conditions favorables de départ supposent naturellement la connaissance de celles-ci.

Les propriétés physiques, qu'il est fondamental d'étudier pour appréhender les relations sol-eau-plante, ne nécessitent sans doute pas la mise au point de méthodes nouvelles d'analyse mais plutôt un choix, parmi celles existantes, pour faciliter la compréhension et le transfert des connaissances entre spécialistes, qu'il s'agisse de la stabilité de la structure, de la porosité et de la perméabilité ou des propriétés hydrodynamiques du sol.

Sous l'angle chimique, une toute première priorité devrait être accordée aux questions suivantes :

1. Constitution et nature de la matière organique, en particulier connaissance du rôle des diverses fractions plus ou moins évoluées sur la structuration du sol. Sous l'angle de la fertilité, trois points méritent une attention plus soutenue : a) le taux de matière organique acceptable pour assurer un rendement convenable dans les écosystèmes transformés par l'agriculture; b) la dynamique de l'azote, en particulier de l'azote organique; c) la dynamique du soufre sous forêt pour mieux comprendre les carences de cet élément en culture.
2. Devenir du phosphore dans les sols riches en hydroxydes et oxydes de fer et d'alumine capables d'immobiliser cet élément.
3. Phosphore du sol directement assimilable par les plantes.
4. Potassium disponible pour les plantes. Il faudra pour cela mettre au point une méthode analytique de détermination des formes assimilables de la potasse du sol.
5. Étude du lessivage du potassium afin de contribuer à celle de l'entraînement de la potasse dans les écosystèmes cultivés.
6. Teneur des profils de sol sous forêt en oligo-éléments les plus importants, afin de prédire les déficiences ou les toxicités lors de leur mise en culture. Un problème méthodologique se posera pour entreprendre cette recherche car il faudra pouvoir caractériser de façon plus précise les propriétés des sols liées aux déficiences en oligo-éléments.
7. Acidité du sol en tant que condition de ses propriétés d'échange en cations.

L'état actuel des connaissances sur la pédologie forestière tropicale fait que les recherches sur toutes ces questions se classent parmi celles que les spécialistes des différents continents sont appelés à considérer en priorité, sans qu'il soit possible d'indiquer un état d'avancement plus grand des études dans un continent que dans un autre.

L'érosion

À l'exception des zones désertiques, où prédomine l'érosion éolienne, et des régions polaires à gel permanent, les terres sont soumises à l'érosion hydrique. Ce phénomène prend, dans les régions tropicales humides, un caractère spécifique maintenant mieux connu depuis que les chercheurs ont voulu y appliquer l'équation de prévision de l'érosion de Wischmeier et Smith (1960). Cette équation a permis de mieux définir l'influence relative des facteurs et conditions de l'érosion. Rappelons qu'elle s'énonce :

$$E = R \cdot K \cdot SL \cdot C \cdot P$$

et signifie que les pertes en terre (E) sont fonction de cinq facteurs et conditions : le climat (R), la résistance du sol (K), la topographie (SL), la couverture du sol (C) et les pratiques anti-érosives (P).

Dans les régions tropicales humides, l'agressivité climatique est extrêmement élevée : l'indice R passe de 200, dans les zones semi-arides d'Afrique, à 1 500 et même, par endroit, à 2 000 sur les côtes du golfe de Guinée, depuis la Guinée jusqu'au Cameroun (Roose, *in* Anon., 1975).

La résistance des sols à l'attaque de l'eau semble, en général, plus satisfaisante que celle de bon nombre de sols lessivés des régions tempérées. Roose (*in* Anon., 1975) soupçonne cela en constatant que K passe de 0,03 à 0,60 aux États-Unis pour des sols de plus en plus sensibles à l'érosion, alors qu'en Côte-d'Ivoire, sur sols ferrallitiques divers, K reste compris entre 0,05 et 0,18. Cette constatation peut ne pas étonner si l'on se réfère au fait que les sols formés sur roches basiques sont en général très bien structurés et très résistants et que les sols plus acides contiennent toujours une quantité suffisante d'aluminium pour assurer la floculation de l'argile (Greenland, *in* Anon., 1975). El Swaify (*in* Anon., 1975) a réalisé aux Hawaï une analyse très poussée de ce facteur « Sol » en utilisant la classification de la 7^e Approximation américaine; il révèle des différences de comportement selon la sécheresse ou l'humidité de la saison.

Sous les tropiques humides, comme ailleurs, l'influence de la longueur de la pente (L) n'est ni constante, ni très élevée. Par contre celle de l'inclinaison de la pente (S) est déterminante : les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente ou selon une équation du second degré très voisine (Wischmeier et Smith, 1960).

Mais les résultats de recherche qui viennent d'être cités ne doivent pas faire oublier que, dans les régions tropicales humides comme ailleurs, la couverture du sol par la végétation reste le facteur conditionnel de l'érosion dont l'importance l'emporte de très loin sur tous les autres. Sans doute, là, cela est-il encore plus vrai du fait d'une érosivité des pluies tellement élevée qu'elle réduit et minimise l'effet de l'érodibilité des sols. L'écosystème forestier joue alors pleinement son rôle.

Là où la forêt, quelle qu'elle soit, existe, l'érosion reste minime car la protection du sol qu'elle réalise contrecarre l'action du facteur créateur du phénomène, la pluie, et des

TABLEAU 6. Érosion (t/ha/an) et ruissellement (pourcentage des précipitations annuelles) sous diverses couvertures végétales en Afrique de l'Ouest (Roose, *in* Anon., 1975)

| Station, type de végétation et pluviosité annuelle | Pente (%) | Érosion (t/ha/an) | | | Ruissellement (% des pluies annuelles) | | | |
|--|--------------|----------------------|--------------------|----------|---|---------|----------|---|
| | | Milieu naturel | Sol nu | Culture | Milieu naturel | Sol nu | Culture | |
| Adiopodoumé (1954-1973) | 4,5 | — | 60 | — | — | 35 | — | |
| Côte-d'Ivoire | | 0,03 | 138 | 0,1 à 90 | 0,14 | 33 | 0,5 à 30 | |
| Forêt secondaire sempervirente | | 20 | 0,2 | 570 | — | 0,7 | 24 | — |
| 2 100 mm : 4 saisons | | 65 | 1,0 | — | — | 0,7 | — | — |
| Divo (1967-1970) | 9 | 0,5 | — | — | — | — | — | |
| Côte-d'Ivoire | | | | | | | | |
| Forêt semi-caducifoliée | 4 | b. ^a 0,20 | 18 à 30 | 0,1 à 26 | b. 0,3 | 15 à 30 | 0,1 à 26 | |
| Bouaké (1960-1970) | | | | | | | | |
| Côte-d'Ivoire | 4 | n.b. 0,01 | 17 à 27,5 | 10 à 85 | 0,1 à 0,9 | 17 | 20 à 25 | |
| Savane arbustive dense | | | | | | | | |
| 1 200 mm : 4 saisons | 4 | 0,3 à 1,2 | après défrichement | — | — | — | — | |
| Cotonou (1964-1968) | | | | | | | | |
| Bénin | 4 | 0,3 à 1,2 | après défrichement | 10 à 85 | 0,1 à 0,9 | 17 | 20 à 25 | |
| Fourré dense | | | | | | | | |
| 1 300 mm : 4 saisons | 4 | 0,3 à 1,2 | après défrichement | 10 à 85 | 0,1 à 0,9 | 17 | 20 à 25 | |
| Fourré dense | | | | | | | | |

a. Les indications b. et n.b. signifient « brûlé » ou « non brûlé ».

conditions qui règlent son intensité. Le tableau 6, dressé par Roose (*in* Anon., 1975) pour l'Afrique de l'Ouest, est révélateur à ce sujet.

Le rôle de la forêt est manifeste et il n'est pas étonnant que le terrain dépourvu de végétation soit le plus érodé. Cette faible perte en terre s'observe tout autant en Amérique tropicale : 2,55 t/ha/an sous forêt naturelle à Trinidad (Bell, 1973), 0,41 t/ha/an sous forêt française, à la Crique Grégoire (ORSTOM, 1975); et en Asie du Sud-Est, moins de 1 t/ha/an à Bandung (Java) sur sol volcanique sous forêt (Gonggrijp, 1941). De même à Périnet (Madagascar), les mesures en petits bassins versants de 1,5 ha ont montré pendant 9 ans que les pertes en terre étaient nulles sous forêt secondaire mais s'élevaient à plus de 9 t/ha/an après mise en culture (Bailly *et al.*, 1974).

Deux points méritent en outre d'être soulignés. Le premier est que la nature même de la forêt dense sempervirente limite moins l'érosion que la forêt tempérée, car sa litière est séparée du sol et laisse place à un ruissellement hypodermique à la surface de l'horizon supérieur. Il est significatif à cet égard de constater que Bennett (1939) cite fréquemment pour l'érosion sous forêt, aux États-Unis, des valeurs annuelles de pertes en terre inférieures à 0,01 t/ha. Le second est que l'intensité de l'érosion sous forêt a pour facteurs l'intensité pluviale et la variation de densité du couvert végétal, comme le démontre très clairement Ruangpanit (1971, tableau 7).

Il est évident que le détachement de particules terreuses entraînaient par l'eau et le ruissellement est d'autant plus considérable que les gouttes d'eau atteignent le sol avec

TABLEAU 7. Relations entre les pertes en terre et les intensités pluviales en Thaïlande du Nord sous différentes densités de couvert végétal, en parcelles expérimentales plus ou moins forestées (Ruangpanit, 1971)

| Intensités pluviales (mm/h) | Pertes en terre (kg/ha) Densités de couvert végétal (% de la surface topographique protégée) | | | |
|-----------------------------------|--|---------|---------|---------|
| | 20 à 30 | 50 à 60 | 60 à 70 | 80 à 90 |
| 0-10 | 6,1 | 4 | 2,9 | 2,6 |
| 10-20 | 19,1 | 19,2 | 9,8 | 10,9 |
| > 20 | 43,6 | 25,2 | 28,1 | 16,9 |

une énergie cinétique élevée, c'est-à-dire lorsqu'elles ne sont pas interceptées par une végétation dense.

Les seules formes nettement visibles d'érosion du sol sous forêt sont les glissements de terrain dus à des situations qui conjuguent l'action de la pente à celle d'horizons imperméables du sol créant des plans de glissement surtout en cas de saturation du milieu. Le nord de l'île de Sarawak illustre bien ce phénomène. On y observe des *slumpings* dus à la présence dans le sol d'un horizon d'argile surmonté en surface par des sables, le tout en forte pente.

L'examen des profils pédologiques laisse également penser qu'un autre mouvement de masse, la reptation du sol, se produit fréquemment sous forêt. La preuve peut en être trouvée par le rabotage de débris de filons de quartz à un certain niveau du profil (type de *stone line*; Fournier, 1958).

Ce n'est qu'en cas de destruction de l'écosystème forestier que l'érosion s'accélère : elle peut atteindre des valeurs catastrophiques. Cette augmentation reste relativement faible si la forêt est remplacée par un autre écosystème arboré plutôt que par des cultures. Ainsi au lac Alaotra (Madagascar), une érosion faible à nulle sous forêt ne s'est élevée qu'à 0,025 t/ha/an sous boisement d'*Eucalyptus* alors qu'elle atteignait plus de 59 t/ha/an pour différentes cultures — mesures faites en 1959-1960 à la Station de recherches agronomiques (Bailly *et al.*, 1974).

L'aménagement des plantations arborées demande cependant les plus grands soins, comme le rappelle Bell (1973) pour les plantations de teck de Trinidad. Il faut éviter le feu qui laisse dénudé le sol en détruisant les espèces buissonnantes qui forment une sorte de « sous-bois » protecteur dans la plantation. Un espacement calculé pour assurer le développement optimal des arbres ainsi que leur disposition en lignes isohypses sont des facteurs favorables à la conservation du sol.

Coster (1938), à Java, a indiqué d'autre part le rôle éminemment protecteur d'un couvert herbacé dense sur lequel l'eau ruisselle mais qui retient la terre. Le fait est bien connu en Afrique où, par exemple, une prairie d'*Aristida* couvrant le sol à 60 et à 100 % ne laisse respectivement partir que 4 et 0,025 t de terre par hectare/an, alors que cette perte s'élève à 12 t/ha/an lorsque 20 % seulement de la surface topographique est protégée. A Madagascar, sur les Hauts Plateaux, les pertes en terre sont nulles sous couvert graminéen dense alors qu'elles s'élèvent à 25 t/ha/an si le couvert est très dégradé (Bailly *et al.*, 1967).

Finalement, ce sont surtout sous les cultures que se produisent les phénomènes dangereux d'érosion accélérée qui nécessitent la mise en œuvre de moyens de conservation. Ces phénomènes sont intermédiaires entre ceux, très faibles, qui caractérisent la forêt, et ceux, très élevés, qui surviennent sur sols nus. Ils varient dans une large mesure en fonction du type de plante, de la vitesse avec laquelle elle recouvre le sol et des techniques culturales mises en œuvre pour aider sa croissance. La densité, la précocité de la plantation, le labour, une fertilisation bien adaptée et éventuellement un paillage d'appoint jouent un rôle prépondérant. Roose (*in* Anon., 1975), étudiant en Afrique le facteur C de l'équation de Wischmeier et Smith, a dressé le tableau 8, très significatif, qui attribue des coefficients d'érosion à différentes cultures et à des couverts végétaux, par rapport à un témoin « sol nu » auquel est attribué le coefficient 1 (résultats de recherches conduites en parcelles expérimentales).

Il n'est pas étonnant qu'une enquête réalisée dans le cadre de la Décennie hydrologique internationale (Unesco/OMM, 1974) fournisse des estimations de transports de sédiments par les cours d'eau des régions tropicales forestières humides s'élevant à seulement 18-37 t/km²/an (Congo) ou 67-87 t/km²/an (Amazone), ce qui est très faible, alors que les bassins très cultivés de l'Asie du Sud-Est fournissent aux océans des tonnages de terre pouvant atteindre 500 à 600 t/km²/an (Mahanadi en Inde ou Si-Kiang en Chine), voire plus de 1 500 t/km²/an (Damodar en Inde).

TABLEAU 8. Érosion en fonction du couvert végétal (Roose, *in* Anon., 1975)

| | C annuel moyen |
|---|----------------|
| Sol nu | 1 |
| Forêt dense ou culture paillée abondamment | 0,001 |
| Savane et prairie en bon état | 0,01 |
| Plantes de couverture à développement rapide ou plantation hâtive | 0,1 |
| Riz en culture intensive | 0,1 à 0,2 |
| Palmier, caféier, cacaoyer avec plantes de couverture | 0,1 à 0,3 |
| Coton, tabac (2 ^e cycle) | 0,5 |
| Igname, manioc | 0,2 à 0,8 |
| Arachide (en fonction de la date de plantation) | 0,4 à 0,8 |
| Maïs, sorgho, mil (en fonction du rendement) | 0,3 à 0,9 |

Un séminaire qui s'est tenu en 1975 à Ibadan (Nigéria), à l'Institut international d'agriculture tropicale (Anon., 1975), présente en outre un tableau de la situation de l'érosion en Amérique latine (Pla), en Afrique (Ahn; Okigbo; Roose), dans la région des Caraïbes (Ahmad) et en Asie du Sud-Est (Panabokke).

Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

C'est essentiellement sous culture et dans le souci de mettre en œuvre une politique de conservation du sol que les études d'érosion sont indispensables. Les mesures réalisées sous forêt ne servent qu'à établir des valeurs témoins. C'est sous cet angle qu'il faut considérer les mesures de pertes en terre dans les régions tropicales humides comme ailleurs. Les axes qui devraient actuellement orienter les travaux sont les suivants :

L'analyse factorielle du phénomène, réalisée à l'aide de parcelles expérimentales sous pluviosité naturelle, est trop longue pour des pays en développement; il est préférable de leur substituer l'analyse par emploi de simulateurs de pluie maintenant mis au point. Il en fonctionne un en Afrique, en Côte-d'Ivoire (Roose, *in* Anon., 1975), et des recherches devraient être entreprises, par application de la même méthode, en Asie du Sud-Est et en Amérique latine, en prenant comme parcelle témoin celle de Wischmeier et Smith (1960) pour rendre les résultats comparables.

L'emploi des bassins représentatifs et expérimentaux pour calculer l'effet des végétations non transformées et celui des écosystèmes créés par l'homme sur l'érosion du sol par le biais de la mesure des débits solides.

L'étude plus poussée de la conservation du sol par les moyens biologiques, c'est-à-dire par une agriculture rationnelle, plutôt que par les moyens mécaniques trop coûteux, qui ne doivent être employés qu'en cas d'échec des premiers.

Bibliographie sélective

Bilan hydrique

- ANDRIEUX, C.; BUSCARLET, L.; GUITTON, J.; MERITE, B. Mesure en profondeur de la teneur en eau des sols par ralentissement des neutrons rapides. In: *Radioisotopes in soil-plant nutrition studies*, p. 187-219. Vienne, AIEA, 1962, 461 p.
- *ANON. *IBP synthesis meeting* (Kuala Lumpur, 12-18 August 1974). Several papers by Ashton, P. S.; Chunkao, K.; Leigh, C. H.; Teoh, T. S. Kuala Lumpur, Pasoh Forest Reserve, 1974, multigr.
- AVENARD, J. H. *La répartition des formations végétales en relation avec l'eau du sol dans la région de Man-Touba*, Paris, ORSTOM, Travaux et Documents n° 12, 1971, 159 p.
- *AUBRÉVILLE, A. *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Paris, Soc. Éd. géographiques, maritimes et coloniales, 1949, 351 p.
- BANERJEE, A. K. Evapotranspiration from a young *Eucalyptus* hybrid plantation of West Bengal. In: *Proc. and Tech. Papers Symp. man-made forests in India* (Society of Indian Foresters, Dehra Dun), 1972.
- BERNHARD-REVERSAT, F.; HUTTEL, C.; LEMÉE, G. Some aspects of the seasonal ecologic periodicity and plant activity in an evergreen rain forest of the Ivory Coast. Quelques aspects de la périodicité écologique et saisonnière en forêt ombrophile sempervirente de Côte-d'Ivoire. In: Golley, P. M.; Golley, F. B. (eds.). *Tropical ecology with an emphasis on organic production*, p. 217-234. Athens, Univ. of Georgia, 1972, 418 p.
- *—; —. Recherches sur l'écosystème de la forêt sub-équatoriale de basse Côte-d'Ivoire: *La Terre et la Vie* (Paris), 29, 1975, p. 169-264.
- BONZON, B.; PICARD, D. Matériels et méthodes pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. *Cah. ORSTOM, Sér. Biol.*, 9, 1969, p. 3-18.
- COSTER, C. De verdamping van verschillende vegetatie vormen of Java. *Tectona*, 30, 1937, p. 1-102.
- *CZARNOWSKI, M. S.; OLZEWSKI, J. L. Rainfall interception by a forest canopy. *Oikos*, 19, 1968, p. 345-350.
- DABRAL, B. G.; RAO, B. K. S. Interception studies in chir and teak plantations, New Forest. *Indian Forester*, 94, 1968, p. 541-551.
- *—; —. Interception studies in sal (*Shorea robusta*) and khair (*Acacia catechu*) plantations, New Forest. *Indian Forester*, 95, 1969, p. 314-323.
- DELVIGNE, J. *Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux en milieu ferrallitique*. Paris, Dunod, 1965, 117 p.
- FLENLEY, J. R. (ed.). *The water relations of Malesian forests. Transactions of the first Aberdeen-Hull Symposium on Malesian ecology*. Univ. Hull, Dept. of Geography, miscellaneous series no. 11, 1971, 97 p.
- *FREISE, F. Das Binneklima von Urwäldern im subtropischen Brasilien. *Petermanns Geogr. Mitteilungen*, 82, 1936, p. 301-307.
- GAUSSEN, H.; LEGRIS, P.; BLASCO, F. *Bioclimats du Sud-Est asiatique*. Inst. français de Pondichéry, Trav. Sect. scientifique et technique, 3, 1967.
- GEIGER, R. *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. 4 édition. Braunschweig, Friedr. Vieweg und Sohn, 1961, 646 p.
- GORNAT, B.; GOLDBERG, D. The relation between moisture measurements with a neutron probe and soil texture. *Soil Sci.*, 114, 1972, p. 254-258.
- GOSSE, G. *Calcul des paramètres agronomiques utilisés dans la formule de Turc pour différentes localités de Côte-d'Ivoire*. Adiopodoumé; ORSTOM, 1973, 24 p. multigr.
- HEWLETT, J. D.; DOUGLAS, J. E.; CLUTTER, J. L. Instrumental and soil moisture variance using the neutron scattering method. *Soil Sci.*, 97, 1964, p. 19-24.
- HOPKINS, B. Vegetation of the Olokemeji Forest Reserve, Nigeria. III. The microclimate, with special reference to their seasonal changes. *J. Ecol.*, 53, 1965, p. 125-138.
- *HUTTEL, C. Estimation du bilan hydrique dans une forêt sempervirente de basse Côte-d'Ivoire. In: *Radioisotopes in soil-plant nutrition studies*. Vienne, AIEA, 1962, 461 p.
- KLINE, J. R.; JORDAN, C. F.; DREWRY, G. Tritium movement in soil of a tropical rain forest (Puerto Rico). *Science*, 160, 1968, p. 550-551.
- *MALAISSE, F. Contribution à l'étude de l'écosystème forêt claire (miombo). Note 8. Le projet miombo. *Ann. Univ. Abidjan, E*, vol. 6, n° 2, 1973, p. 227-250.
- *MCCOLL, J. G. Properties of some natural waters in a tropical wet forest of Costa Rica. *Bio-Science*, 20, 1970, p. 1096-1100.
- *MCGINNIS, J. T.; GOLLEY, F. B.; CLEMENTS, R. G.; CHILD, G. I.; DUEVER, M. J. Elemental and hydrology budgets of the Panamian tropical moist forest. *Bio-Science*, 19, 1969, p. 697-700.
- MOUTONNET, P.; BUSCARLET, L.; MARCESSE, J. Emploi d'un humidimètre à neutrons de profondeur associé à un réflecteur pour la mesure de la teneur en eau des sols au voisinage de la surface. *Ann. I.T.B.T.P.*, 233, 1967, p. 1-5.
- *NYE, P. H. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and Soil*, 13, 1961, p. 333-346.
- *ODUM, H. T.; MORE, A. M.; BURNS, L. A. Hydrogen budget and compartments in the rain forest. In: Odum, H. T.; Pigeon, R. F. (eds.). *A tropical rain forest*, H105-H122. Division of Technical Information, USAEC, 1970, 1 678 p.
- *OVINGTON, J. D. A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry*, 27, 1954, p. 41-53.
- RAO, B. K. S.; DABRAL, B. G.; RAMOLA, B. C. Quality of water from forested watersheds. *Indian Forester*, vol. 99, no. 12, 1973.
- *ROOSE, E. J. Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. *C. R. Coll. sur la fertilité des sols tropicaux (Tananarive)*, II, 1967, p. 1385.
- ; HENRY DES TURREAUX, P. Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans un sol en place. *Agron. Trop.*, 25, 1970, p. 1079-1087.
- *RUANGPANIT, N. Crown cover of hill-evergreen trees as affected to soil and water losses. Faculty of Forestry, Kasetsart University (Bangkok), *Kog-Ma Watershed Research Bulletin*, vol. 7, no. 7, 1971, 25 p.
- SABHASRI, S.; CHUNKAO, K.; NGAMPONGSAI, C. *The estimation of evapotranspiration of the old clearing and the dry evergreen forest, Sakaerat, Nakorn, Rachasima*. Bangkok, Faculty of Forestry, Kasetsart University, 1970, 6 p. multigr.
- SCHMIDT, F. H.; FERGUSON, J. H. A. Rainfall types based on wet and dry period ratios for Indonesia with western New Guinea. *Verhan. Djawatan Meteorologi dan Geofisik* (Djakarta), 42, 1951.
- SOLLINGS, P.; DREWRY, G. Electrical conductivity and flow rate of water through the forest canopy. In: Odum, H. T.; Pigeon, R. F. (eds.). *A tropical rain forest*, H137-H153. USAEC, 1970, 1 678 p.

* Référence importante.

- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 1948, p. 85-94.
- *TURC, L. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales agri. INRA*, 12, 1961, p. 13-49.
- ULLAH, W.; JAISWAL, S. D.; RAWAT, U. S. Accuracy of rainfall sampling in forest clearings. *Indian Forester*, 96, 1970, p. 195-202.
- *WHITMORE, T. C. *Tropical rain forests of the Far East*. Oxford, Clarendon Press, 1975, 278 p., 550 références.
- Pédologie générale et classification des sols*
- *AHN, P. M. *West African soils*. London, Oxford University Press, 1970, 332 p.
- *AUBERT, G. Influence des divers types de végétation sur les caractères et l'évolution des sols en régions équatoriales et subéquatoriales ainsi que leurs bordures tropicales semi-humides. In: *Sols et végétation des régions tropicales* (Travaux du Colloque d'Abidjan, 1959), p. 41-48. Paris, Unesco, 1961, 115 p.
- *—. Classification des sols utilisée par la section de Pédologie de l'ORSTOM. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 3, 1961, p. 269-288.
- BAVER, L. D. *Summary of Hawaiian contributions to the study of tropical soils*. Washington, D.C., Committee on Tropical Soils, U.S. National Research Council, 1970, 17 p. multigr.
- BLANCANNEAUX, Ph. *Essai de synthèse pédo-géomorphologique et sédimentologique de la Guyane française*. Paris, ORSTOM, 1974, 141 p. multigr.
- *BOYER, J. *Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone*. Washington, D.C., Committee on Tropical Soils, U.S. National Research Council, 1970, 175 p. multigr.
- *BURINGH, P. *Introduction to the study of soil in tropical and subtropical regions*. 2nd ed. Wageningen, Centre for agricultural publishing and documentation, 1970, 99 p.
- *Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops. *A review of nitrogen in the tropics with particular reference to pastures*. Farnham Royal, Bucks. (England), Commonwealth Agricultural Bureaux, 1962, Bulletin 46, 185 p.
- *COULTER, J. K. *Soils of Malaysia. A review of investigations on their fertility and management*. Washington, D.C., Committee on Tropical Soils, U.S. National Research Council, 1970, 54 p. multigr.
- *DUDAL, R. *Dark clay soils of tropical and subtropical regions*. Rome, FAO Agricultural Development, Paper no. 83, 1965, 161 p.
- FAO and UNESCO. *Approaches to soil classification*. Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 32, 1968, 143 p.
- . *Definitions of soil units*. Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 33, 1968, 72 p.
- . *Soil map of South America*. Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 34, 1968.
- . *Supplement to report no. 33* (cf. plus haut). Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 37, 1969, 72 p.
- *FINCK, A. *Tropische Boden*. Berlin, Verlag Paul Parey, 1963, 188 p.
- Interamerican Institute of Agricultural Sciences. *Volcanic ash soils in Latin America*. Turrialba (Costa Rica), Training and Research Center of Interamerican Institute of Agricultural Sciences, 1969, 341 p.
- LE MARE, P. H. *A review of soil research in Tanzania*. Washington, D.C., Committee on Tropical Soils, U.S. National Research Council, 1970, 25 p. multigr.
- LEMONS, R.; COSTA, D. The main tropical soils of Brazil. Rome, FAO, *World Soil Resources Report* no. 32, 1968, p. 95-106.
- *MOHR, E. J. C.; VAN BAREN, F. A. *Tropical soils*. London and New York, Interscience, 1954, 498 p.
- *MOSS, R. P. (ed.). *The soil resources of tropical Africa*. A symposium of the African Studies Association of the United Kingdom. London, Cambridge University Press, 1968, 226 p.
- *NYE, P. H.; GREENLAND, D. J. *The soil under shifting cultivation*. Farnham Royal, Harpenden, Bucks. (England); Commonwealth Bureau of Soils, Commonwealth Agricultural Bureau, 1960, Technical Communication no. 51, 156 p.
- *PHILLIPS, J. F. V. *The development of agriculture and forestry in the tropics*. 2nd ed. London, Faber and Faber, 1966, 212 p.
- SIEFFERMANN, G.; MILLOT, G. Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroon. In: *Proc. Int. Conf. Tokyo*, 1969, p. 417-430.
- *SOMBROEK, W. G. *Amazon soils*. Wageningen, Centre for agricultural publishing and documentation, 1966, 292 p.
- *STACE, H. C. T.; HUBBLE, G. D.; BREWER, R.; NORTH-COTE, K. H.; SLEEMAN, J. R.; MULCAHY, M. J.; HALLSWORTH, E. G. *Handbook of Australian soils*. Glenside (South Australia), Rellim Technical Publications, 1968.
- *STEPHENS, C. G. *A manual of Australian soils*. Melbourne, CSIRO, 1962, 62 p.
- . Soils of Uganda. In: Jameson, U. D. (ed.). *Agriculture in Uganda*, 2nd ed. London, Oxford University Press, 1970, 414 p.
- *SYS, C.; VAN WAMBEKE, A.; FRANKART, R.; GILSON, P.; JONGEN, P.; PÉCROT, A.; BERCE, J. M.; JAMAGNE, M. *La cartographie au Congo*. Bruxelles, INEAC, Série technique n° 66, 1961, 149 p.
- TAVERNIER, R.; SYS, C. *Classification of the soils of the Republic of the Congo*. Kinshasa, Pédologie, Spécial no. 3, 1965, multigr.
- USDA. *Soil classification; a comprehensive system, 7th Approximation*. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1960, 265 p.
- VAN WAMBEKE, A. *Republic of the Congo (Kinshasa): status of soil studies*. Washington, D.C., Committee on Tropical Soils, U.S. National Research Council, 1970, 13 p. multigr.
- Propriétés physiques*
- *BAVER, L. D. *Soil physics*. Third edition. London, Chapman and Hall, 1956, 398 p.
- . TROUSE, A. C., Jr. *Tillage problems in the Hawaiian sugar industry. I. Basic principles of compaction in relation to Hawaiian soils*. Exp. Sta. Hawaiian Sugar Planters Association, Techn. Suppl. Soils Rep. no. 9, 1965, multigr.
- BONNET, J. A. Relative infiltration rates of Puerto Rican soils. *J. Agr. Univ. Puerto Rico*, 52, 1968, p. 233-240.
- BOYER, J.; COMBEAU, A. Étude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de la République Centrafricaine. *Sols Africains*, 5, 1960, p. 6-42.
- CAGAUA, B.; UEHARA, G. Soil anisotropy and its relation to aggregate stability. *Soil Science Soc. Am. Proc.*, 29, 1965, p. 198-200.
- COMBEAU, A.; QUANTIN, P. Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédologie*, 3, 1963, p. 17-26.
- EL SWAIFY, S. A.; AHMED, S.; SWINDALE, L. D. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red

- and tropical black earths. II. Liquid limit, degree of dispersion, and moisture retention. *J. Soil Sci.*, 21, 1970, p. 188-198.
- GROHMANN, F.; CONAGIN, A. Técnica para o estudo da estabilidade de agregados do solo. *Bragantia*, 19, 1960, p. 329-343.
- *HÉNIN, S.; MONNIER, G.; COMBEAU, A. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 9, 1958, p. 73-92.
- KITTREDGE, J. *The influence of the forest on the weather and other environmental factors. Forest influences.* Rome, FAO Forests and Forest Production Studies no. 15, 1962.
- LEBRUN, J.; GILBERT, G. *Une classification écologique des forêts du Congo.* Bruxelles, Publ. INEAC, Sér. sci., n° 63, 1954, 89 p.
- LEMÉE, G. Effets des caractères du sol sur la localisation de la végétation en zones équatoriale et tropicale humide. In: *Sols et végétation des régions tropicales (Tropical soils and vegetation)*, p. 25-39. Paris, Unesco, 1961, 115 p.
- LUGO-LOPEZ, M. A.; JUAREZ, J. Jr. Evaluation of the effects of organic matter and other soil characteristics upon the aggregate stability of some tropical soils. *J. Agric. Univ. Puerto Rico*, 43, 1959, p. 268-272.
- MOLINA, J. S.; DE GIUFFRÉ, L. S. Colloid production in the aerobic decomposition of cellulose and their influence upon the structure of different soil types. In: *Arg. 5th Cong. Int. Microbiol.* (Rio de Janeiro), 2, 1961, p. 594-601.
- *MONNIER, G. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 16, 1965, p. 327-400.
- *PEREIRA, H. C. Soil structure criteria for tropical crops. *Trans. 5th Int. Cong. Soil Sci.*, 2, 1954, p. 59-64.
- . The assessment of structure in tropical soils. *J. Agric. Sci.*, 45, 1954, p. 401-410.
- . A rainfall test for structure of tropical soils. *J. Soil Sci.*, 7, 1956, p. 68-74.
- ROBERTS, R. C. Structural relationships in a lateritic profile. *Am. Soil Surv. Assoc. Bull.*, 14, 1933, p. 88-90.
- SHARMA, M. L.; UEHARA, G. Influence of soil structure on water relations in low humic latosols. I. Water retention. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 1968, p. 770-774.
- SMITH, R. M.; CERNUDA, C. F. Some characteristics in the macrostructure of tropical soils in Puerto Rico. *Soil Sci.*, 73, 1952, p. 183-192.
- UEHARA, G.; FLACK, K. W.; SHERMAN, G. D. Genesis and micromorphology of certain soil structural types in Hawaiian latosols and their significance to agricultural practices. *Int. Soc. Soil Sci. New Zealand, Trans. Joint Meet. Comm. IV and V*, 1962, p. 264-294.
- Propriétés chimiques*
- ACQUAYE, D. K.; MACLEAN, A. J.; RICE, H. M. Potential and capacity of potassium in some representative soils of Ghana. *Soil Sci.*, 103, 1967, p. 79-89.
- AHN, P. M. The principal areas of remaining original forest in Western Ghana and their agricultural potential. *Journal of the West African Science Association*, vol. 5, no. 2, 1959, p. 91-167.
- ALLOS, H. F.; BARTHOLOMEW, W. V. Replacement of symbiotic fixation by available nitrogen. *Soil Sci.*, 87, 1959, p. 61-66.
- ATTOE, O. J. Potassium fixation and release in soils occurring under moist and drying conditions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 11, 1946, p. 145-149.
- AUBERT, G.; TAVERNIER, R. Soil survey. In: *Soils of the humid tropics*, p. 17-44. Washington, D.C., National Academy of Sciences, 1972, 219 p.
- AYRES, A. S.; HAGIBARA, H. H. Available phosphorus in Hawaiian soil profiles. *Hawaiian Planter's Rec.*, 54, 1952, p. 81-99.
- . Effect of the anion on the sorption of potassium by some humic and hydrol-humic latosols. *Soil Sci.*, 75, 1953, p. 1-17.
- BABALOLA, O.; CHEHEDA, H. R. Effects of crops and soil management systems on soil structure in Western Nigerian soils. *Nigerian Journal of Science* (Ibadan Univ. Press), vol. 6, no. 1, 1972.
- BARBIER, G. La dynamique du potassium dans le sol. In: *Potassium symposium 1962*, p. 231-258. Bern (Switzerland), International Potash Institute, 1962, 632 p.
- BARROW, N. J. A comparison of the mineralization of nitrogen and of sulfur from decomposing organic materials. *Aust. J. Agr. Res.*, 11, 1960, p. 960-969.
- BARTHOLOMEW, W. V. Nitrogen loss process—a recapitulation. *Soil Sci. Soc. N.C. Proc.*, 7, 1964, p. 78-81.
- *—. Mineralization and immobilization of nitrogen in the decomposition of plant and animal residues. In: Bartholomew, W. V.; Clark, F. E. (eds.). *Soil nitrogen—Agronomy Monograph no. 10*, p. 285-306. Madison, Wis., American Society of Agronomy, 1965, 615 p.
- *—. Soil nitrogen and organic matter. In: *Soils of the humid tropics*, p. 63-81. Washington, D.C., National Academy of Sciences, 1972, 219 p.
- BLOOMFIELD, C.; COULTER, J. K.; KANARIS-SOTIRIOU, R. Oil palms on acid sulphate soils in Malaya. *Trop. Agr.*, 45, 1968, p. 289-300.
- *BOUYER, S.; DAMOUR, M. Les formes du phosphore dans quelques types de sols tropicaux. *Transactions 8th Int. Cong. Soil Sci.*, 4, 1964, p. 551-561.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Soil phosphorus fractions in some representative soils. *J. Soil Sci.*, 9, 1958, p. 109-119.
- CHARREAU, C.; FAUCK, R. Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Sefa (Casamance). *Agron. Trop.*, vol. 25, n° 2, 1970, p. 151-191.
- DABIN, B. Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. *Coton Fibres Trop.*, 25, 1970, p. 213-234.
- DÖBEREINER, J. Non-symbiotic nitrogen fixation in tropical soils. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 3, 1968, p. 1-6.
- ENWEZOR, W. O.; MOORE, A. W. Phosphorus status of some Nigerian soils. *Soil Sci.*, 102, 1966, p. 322-328.
- FOX, R. L.; OLSON, R. A.; RHODES, J. F. Evaluating the sulfur status of soils by plant and soil tests. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28, 1964, p. 243-246.
- GASSER, J. K. R.; BLOOMFIELD, C. The mobilization of phosphate in water-logged soils. *J. Soil Sci.*, 6, 1955, p. 219-232.
- HARDON, H. J. Factoren, die de organische stof en stickstofgehalten van tropische gronden beheerschen. *Korte Med. Algem. Proefsta Landb.*, no. 18, 1936.
- HESSE, P. R. Sulphur and nitrogen changes in forest soils of East Africa. *Plant and Soil*, 9, 1957, p. 86-96.
- KHEMNARK, C.; WACHARAKITTI; AKSORNKOAE, S.; KAEWLA-IAD, T. Forest production and soil fertility at Nihom Doi Chiangdao, Chiangmai Province. *Kasetsart Univ. For. Res. Bull.* (Faculty of Forestry), 1972, p. 22-24.
- LE MARE, P. H. Soil fertility studies in three areas of Tanganyika. *Emp. J. Exp. Agr.*, 27, 1959, p. 197-222.
- McCLUNG, A. D.; DE FREITAS, L. M. M. Sulphur deficiency in soils from Brazilian campos. *Ecology*, 40, 1959, p. 315-317.
- MIDDELBURG, H. A. Potassium in tropical soils: Indonesian archipelago. In: *Potassium symposium*, p. 221-257. Bern (Switzerland), International Potash Institute, 1955, 613 p.

- MOSS, P.; COULTER, J. K. The potassium status of West Indies volcanic soils. *J. Soil Sci.*, 15, 1965, p. 284-298.
- NG, S. K. Potassium status of some Malayan soils. *Malayan Agric. J.*, 45, 1965, p. 143-161.
- NYE, P. H.; BERTHEUX, M. H. The distribution of phosphorus in forest and savannah soils of the Gold Coast and its agricultural significance. *J. Agri. Sci.*, 49, 1957, p. 141-159.
- *PIERRE, W. H.; NORMAN, A. G. *Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition*. Agron. Monogr. no. 4, New York, Academic Press, 1953, 492 p.
- ROOSE, E.; GODEFROY, J. Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie. *Fruits*, 23, 1968, p. 580-584.
- ; —; MULLER, M. Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de basse Côte-d'Ivoire. *Fruits*, 25, 1970, p. 403-420.
- SCHREINER, O.; BROWN, B. E. Soil nitrogen. In: *Soils and men*, p. 361-376. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, U.S. Government Printing Office, 1938, 1232 p.
- WIKLANDER, L. Forms of potassium in the soil. In: *Potassium symposium*, p. 109-121. Bern (Switzerland), International Potash Institute, 1954, 445 p.
- WOODRUFF, C. M. Estimating the nitrogen delivery of soil from the organic matter determination as reflected by Sanborn field. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 14, 1950, p. 208-212.
- YOUNGE, O. R.; PLUCKNETT, D. L. Quenching the high phosphorus fixation of Hawaiian latosols. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 30, 1966, p. 653-655.
- Érosion*
- *ANON. Workshop on *Soil conservation and management in the humid tropics* (Ibadan, 30 June-4 July 1975). Several papers by Ahmad, N.; El Swaify, S. A.; Greenland, D. J.; Okigbo, B. N.; Panabokké, C. R.; Pla, I.; Roose, E. Ibadan, International Institute of Tropical Agriculture, 1975, multigr. Proceedings to be published in 1977.
- *AUBREVILLE, A. Érosion sous forêts et érosion en pays déforesté dans la zone tropicale humide. *Bois et Forêts des Tropiques* (Nogent-sur-Marne), 68, 1959, p. 3-14.
- BAILLE, I. C. *An occurrence of charcoal in soil under primary forest*. Unpublished report, Forest Department, Kuching, Sarawak, 1971, 10 p.
- BAILLY, C.; DE VERGNETTE, J.; BENOIT DE COIGNAC, G.; VELLY, J.; CELTON, J. Essai de mise en valeur d'une zone des Hauts Plateaux malgaches (Manankazo) par l'aménagement rationnel. Effet de cet aménagement sur les pertes en terre et le ruissellement. In: *C.R. Coll. sur la fertilité des sols tropicaux* (Tananarive), II, 1967, p. 1362-1383.
- *—; BENOIT DE COIGNAC, G.; MALVOS, C.; NINGRE, J. M.; SARRAILH, J. M. Étude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentations en bassins versants élémentaires. *Cahiers Scientifiques, Suppl. Bois et Forêts des Tropiques* (Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne), n° 4, 1974, 114 p.
- BELL, T. I. W. Erosion in the Trinidad teak plantations. *Commonwealth Forestry Review* (London), vol. 52, no. 3, 1973, p. 223-233.
- BELL, W. V. *Protecting plantations of long-fibre tree species from moss by insects and disease*. Rome, FAO, Technical Report, UNDP/SF project MAL/12, no. 4, 1971, 24 p.
- *BENNETT, H. H. *Soil conservation*. New York, MacGraw-Hill, 1939, 1 vol., 993 p.
- COSTER, C. Bovengrondsche afstromingen en erosie op Java. *Med. Boschb. Proefsta.*, no. 64, 1938.
- *FAO. *Forest influences*. Rome, 1962, 307 p.
- *FOURNIER, F. *Contribution à l'étude de la conservation du sol en Afrique occidentale française*. Paris, ORSTOM, 1958, 134 p. multigr.
- *—, Research on soil erosion and soil conservation in Africa. *Sols Africains* (Paris), 1965, p. 53-96.
- FREEMAN, J. D. *Report on the Iban of Sarawak*. Kuching, Sarawak, Government Printing Office, 1955, 54+85 p.
- GONGGRIP, L. Het erosie-onderzoek. *Tectona* (Buitenzorg, Java), no. 34, 1941, p. 200-220.
- *GOUJON, P.; BAILLY, C.; DE VERGNETTE, J.; BENOIT DE COIGNAC, G.; ROCHE, P.; VELLY, J.; CELTON, J. Conservation des sols en Afrique et à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 118, 119; 120; 121, 1962.
- UNESCO/OMM. *Actes de la Conférence internationale sur les résultats de Décennie hydrologique internationale et sur les programmes futurs en hydrologie*. Paris, Unesco, 1974, 5 vol., 118 p., 132 p., 96 p., 111 p., 82 p.
- *WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. In: *7th Int. Cong. Soil Science*, vol. 1, 1960, p. 418-425.