

Bilan hydrique

Pluviosité
 Pénétration des pluies à travers le couvert
 Écoulement le long des troncs
 Interception
 Évapotranspiration
 Ruissellement et drainage
 Variations de la réserve en eau du sol
 Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Sols

Sols des écosystèmes forestiers tropicaux : classification, propriétés physiques et chimiques, fertilité
 Caractéristiques générales des sols des écosystèmes forestiers tropicaux
 Facteurs physiques de la fertilité
 Profondeur du sol et différenciation des horizons
 Texture
 Structure
 Porosité et perméabilité
 Propriétés hydrodynamiques

Facteurs chimiques de la fertilité

Matière organique, azote et soufre
 Soufre
 Phosphore
 Cations alcalins et alcalino-terreux
 Oligoéléments
 Aluminium
 Fer
 Silice

Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Érosion

Introduction
 Causes de l'érosion
 Facteurs modifiant l'érosion potentielle
 Couvert végétal et techniques culturales
 Travail du sol
 Pente
 Érodibilité des sols
 Pratiques antiérosives
 Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Bibliographie sélective

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.

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.

L'Afrique a été également le lieu d'études plus approfondies de pluviosité. Brunet-Moret (1963, 1967) a rassemblé et critiqué les données journalières pluviométriques.

ques disponibles en Afrique de l'ouest. Il a publié une carte de répartition des hauteurs moyennes des pluies annuelles et a étudié parallèlement les intensités des averses exceptionnelles. En établissant des courbes « intensité $\times$ durée » pour des averses de fréquence variable, il a montré que l'intensité des averses rares est d'autant plus élevée que le montant moyen annuel des pluies est lui-même plus élevé.

Eldin (1971) pour sa part a défini 18 zones de régime hydrique en Côte-d'Ivoire en se fondant sur des cartes pluviométriques, d'ETP et de déficit hydrique.

Mais lorsqu'il s'agit d'une étude à l'intérieur des écosystèmes forestiers tropicaux, c'est-à-dire sous le couvert végétal, on constate que les précipitations reçues sont encore peu connues du fait du très faible nombre de postes permanents de mesure. Dans l'ensemble Afrique-Madagascar, une station convenablement équipée existe en forêt de Périmet, à Madagascar. Roose d'autre part a installé des postes pluviométriques équipés en pluviographes dans 11 stations de Côte-d'Ivoire. Il a en outre effectué des études pluviométriques détaillées sous forêt à Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire) à l'aide de 12 pluviomètres et a montré que la proportion des pluies qui entrent à l'intérieur des écosystèmes forestiers varie d'une année à l'autre en fonction de l'importance des pluies et surtout de leur répartition. Tous les résultats obtenus sont consignés dans la publication de Roose (1981). Il convient de signaler en outre 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 notoire 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.

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-caducifoliées d'Indonésie. Il se confirme par calcul en Afrique, où Malaisse (1973) constate la péné-

tration par égouttement dans le miombo zaïrois (forêt claire à *Brachystegia* et *Isoberlinia*) de 890 et 1 148 mm sur les 1 105 et 1 463 mm tombés respectivement en 1973 et 1974. 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 par Roose (cité par Huttel dans Bernhard-Reversat, Huttel et Lemée, 1975) en se fondant sur une idée des forestiers des USA. 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.

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. 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 %. Par contre des valeurs sensiblement supérieures ont été recueillies au Brésil (Freise, 1936), 28 % ; et à Porto Rico, 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 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.

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 (McColl, 1970) ; 8 % en Malaisie (Chunkao, dans 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) ; 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.

Roose en Côte-d'Ivoire (1981) s'est lancé dans cette voie en étudiant de 1969 à 1975 l'interception d'un couvert d'une forêt secondaire dense humide à faciès littoral, riche en palmiers et fromagers. La moyenne annuelle de l'égouttement étant de l'ordre de 86 % de la hauteur d'eau tombée, l'interception dans le cas étudié a été évaluée à 14%. Roose a surtout montré que cette interception dépend avant tout de la surface foliaire au-dessus des pluviomètres capteurs et de l'architecture des arbres. L'influence de l'intensité pluviale semble secondaire par rapport à celle du couvert car une fois que toute la surface foliaire est recouverte d'un film d'eau, tout apport ultérieur n'est plus retenu. Il faut donc s'attacher à évaluer l'importance du nombre de pluies dont la hauteur dépasse une valeur critique dépendant de la capacité de rétention de la surface foliaire de la voute forestière.

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 d'Afrique poursuivant des études d'évapotranspiration sous forêt : Côte-d'Ivoire, Zaïre. 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.

Ruissellement et 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).

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

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 %.

Cependant, dans une grande partie des forêts de basse altitude moins arrosées (1 600 à 2 200 mm), les écoulements 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 en 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. 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 kaolinique 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 Blancaneaux (1979), 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.

De premières notions apparaissent d'ailleurs dans ce domaine. Roose (1981) a vérifié qu'un sol à couvert forestier permet une infiltration quasi totale des pluies annuelles (2 % seulement de ruissellement). Mais en milieu subéquatorial recevant en moyenne plus de 2 500 mm de pluie par an il suffit qu'il existe dans le sol à 40 cm un horizon de profondeur qui se colmate et empêche l'eau d'atteindre la nappe pour que le ruissellement annuel s'élève à 20 % des précipitations annuelles et que, pour une averse rare, il s'élève même à 90 % de la pluie tombée.

Valentin et Collinet ont mis en évidence, en Côte-d'Ivoire, que l'état de surface du sol est plus important que le type de sol lui-même, quant au ruissellement, surtout en milieu dégradé par l'homme. Ils confirment l'importance des pellicules de battance.

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 Yapo).

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 cohé-

rentes 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 sur toute l'épaisseur du profil grâce aux humidimètres à neutrons maintenant disponibles. Ces mesures devraient être couplées à des études de ruissellement de surface et de hauteur de la nappe phréatique.

5. Lancer des études intégrées de milieu forestier, en particulier en portant attention au bilan hydrique tout au long des toposéquences et à l'évolution, au cours de l'année, de la macroporosité des sols et de l'humidité des profils.

Sols

Une première propriété importante des sols tropicaux concerne le degré très poussé d'altération de leurs roches mères (Aubert, 1961). 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, que ceux des savanes. Ce sont donc les principales caractéristiques physiques et chimiques de ceux de la première série indiquée ci-dessus qui sont passées ici en revue.

Sols des écosystèmes forestiers tropicaux : classification, propriétés physiques et chimiques, fertilité

Les propriétés des types de sols les plus répandus dans les régions couvertes par la forêt tropicale ont été relativement bien déterminées, même si la connaissance de la répartition spatiale de ces sols est encore incomplète. Le potentiel de fertilité de la grande majorité de ces sols résulte étroitement de l'action des facteurs chimiques et physiques très particuliers de la pédogenèse en milieu tropical humide ou équatorial.

Caractéristiques générales des sols des écosystèmes forestiers tropicaux

La presque totalité des sols peut être classée en se référant à la classification française (Commission permanente de la classification des sols, 1967 ; Aubert et Segalen, 1966) dans les classes des sols ferrallitiques, des sols à sesquioxides (sols ferrugineux tropicaux), des sols hydromorphes, des andosols, des sols peu évolués. Dans la Taxonomie américaine, ils correspondent principalement aux oxisols, ultisols, alfisols, inceptisols, plus rarement aux mollisols (SSS. USDA. Soil Taxonomy 1975). Sur la carte des sols du Monde (FAO-Unesco), ils sont indiqués, suivant les points, le plus souvent, comme ferralsols, nitosols, acrisols, luvisols, gleysols, moins souvent comme arenosols, regosols, fluvisols et andosols.

Les sols les plus typiques de ces écosystèmes forestiers tropicaux — sols ferrallitiques, ferralsols, acrisols, oxisols, ultisols — sont caractérisés par une altération très poussée des minéraux des roches. Celle-ci est étudiée depuis fort longtemps (Chatelin, 1972) et une récente synthèse dans le domaine plus strictement ferrallitique (Chatelin, 1974) passe en revue les travaux les plus récents, qui sont l'œuvre de pédologues comme de géologues. Les transformations des minéraux des roches dans des conditions physico-chimiques variables essentiellement liées au drainage ont fait l'objet d'études sur le terrain comme au laboratoire (Bonifas, 1959 ; Leneuf, 1959 ; Gastuche *et al.*, 1961 ; Herbillon *et al.*, 1962 ; Pecrot *et al.*, 1962 ; Pedro, 1964 ; Delvigne, 1965 ; Lelong, 1969 ; Fripiat *et al.*, 1971) et l'introduction de la thermodynamique et de la modélisation (Tardy, 1969 ; Sarazin *et al.*, 1982) ont permis de mieux connaître les mécanismes intimes de cette altération et d'expliquer la dominance de la kaolinite (associé plus ou moins longtemps à l'halloysite et l'illite) dans les sols les plus évolués.

Dans le haut du profil aux transformations minéralogiques, désormais plus discrètes, s'ajoutent les transformations structurales, qui constituent la pédogenèse proprement dite, que ce soit la pédoplasation à la base du profil (Beaudou *et al.*, 1979) ou des processus comme l'appauvrissement et l'induration.

Comme pour l'étude de l'altération, les toutes dernières techniques d'observation et d'analyse (microscopie optique ou électronique à transmission, microscopie électronique à balayage, microsonde de Castaing, rayons X sur échantillon perturbé ou sur lame mince) ont seules permis d'avancer dans ce domaine et d'expliquer les principales caractéristiques de ces sols et les transformations pédologiques anciennes, récentes ou actuelles qui les ont affectés (Segalen, 1957 ; Herbillon *et al.*, 1966 ; Bourgeat, 1972 ; Fauck, 1972 ; Fölster *et al.*, 1971 ; Levêque, 1975 ; Chauvel, 1977 ; Sieffermann, 1973 ; Roose, 1981).

La formation et la mobilité des hydroxydes (Segalen, 1964 ; 1973), le devenir du quartz et de la kaolinite (Gastuche *et al.*, 1954 ; Aubert, 1954 ; Fauck, 1970 ; Chauvel, 1972 ; Claisse, 1972 ; Muller *et al.*, 1980) et les réarrangements que subissent tous ces éléments (Beaudou *et al.*, 1977 ; Muller, 1977, 1978, 1981) explique aussi bien les principales caractéristiques physiques et hydrodynamiques de ces sols (Humbel, 1974, 1976 ; Roose, 1981) que les importantes accumulations qu'on y observe (Maignien, 1958, 1966 ; Boulvert, 1971 ; Boulangé *et al.*, 1973 ; Leprun, 1979 ; Muller *et al.*, 1980-1981).

Ces accumulations peuvent d'ailleurs constituer les premières contraintes physiques pour la végétation, quand elles sont peu profondes, ce qui diminue l'épaisseur de sol utilisable par les racines des plantes. La présence d'une nappe de gravats (stone-line des auteurs anglo-saxons) peut avoir les mêmes inconvénients que ces éléments pédogénétiques indurés. L'étude de la mise en place, sans doute ancienne, de ces nappes de gravats a progressé, (Aubert, 1950 ; Vogt, 1966 ; Collinet, 1969 ; Riquier, 1969 ; Segalen, 1969 ; Levêque, 1975) sans qu'une seule explication générale et cohérente se soit finalement dégagée.

Dans la partie supérieure du profil ces sols subissent des actions beaucoup plus en rapport avec le climat et la végétation actuels ou leurs modifications récentes (Martin, 1973, 1977). L'un des processus le plus fréquemment observé est alors l'appauvrissement granulométrique, qui peut aussi être lié à la texture grossière du matériau. Le profil textural est alors très différencié, mais l'on n'a jamais observé nettement d'accumulation vraie et importante d'argile, cutanes et argilanes restant toujours discrets (Fauck, 1971 ; Muller, 1972). L'illuviation verticale paraît limitée et il s'agit souvent d'un double processus d'appauvrissement par érosion superficielle préférentielle et de formation de plasma par altération spécifique (Muller, 1972 ; Levêque, 1975). Dans certains cas limite il y a cependant une véritable transformation pédologique et passage d'un type de sol bien drainé à un nouveau sol beaucoup plus marqué par l'hydromorphie (Chauvel, 1977).

En rapport avec la variabilité de la couverture végétale et de l'intensité du facteur climat, les teneurs en matière organique des horizons humifères sont variables (Perraud, 1970, 1971 ; de Boissezon *et al.*, 1973 ; Martin, 1973 ; Humbel *et al.*, 1977). Mais il n'y a pas de litière importante et les horizons humifères ne sont jamais très épais car la minéralisation de la matière organique est rapide. Les acides fulviques, toujours dominants et très mobiles, migrent généralement en profondeur, mais peuvent avoir dans certains cas une action lessivante et même podzolissante.

La capacité d'échange de ces sols est essentiellement liée à la matière organique (de Boissezon, 1970 ; Martin, 1973) et n'atteint donc des valeurs correctes que dans l'horizon humifère : elle ne dépend que peu des teneurs en argile, celle-ci étant essentiellement la kaolinite à faible capacité d'échange naturelle. Le rôle exact des différents constituants de la capacité d'échange (humus, minéraux argileux, hydroxydes) et de leur mode de liaison n'a encore fait l'objet que de peu de recherches (Fripiat *et al.*, 1952 ; Sumner, 1963).

La dynamique des principaux cations commence à être mieux connue aussi bien théoriquement que d'après les résultats des essais de fertilisation ou de bilan géochimique. En particulier l'on sait maintenant que tous les sites d'échange ne sont pas utilisés de la même façon par les différents cations. Après les pays tempérés le phénomène a été étudié pour les sols tropicaux et en particulier pour le potassium (Sumner, 1966 ; Acquay *et al.*, 1967 ; Mohinder Sing, 1970 ; Boyer, 1972, 1973 ; Forster, 1972). De même le rôle de l'aluminium dans l'acidité des sols et son antagonisme avec d'autres cations, étudiés surtout aux États-Unis (Kamprath, 1972) et au Brésil ont fait également l'objet de recherches et d'observations en Afrique (Pieri, 1974 ; Velly, 1974 ; Boyer, 1976, 1978 ; Trinh, 1976, 1977). Des recherches de base sont cependant nécessaires dans ce domaine, aussi bien du côté du sol que des végétaux, pour asseoir sur des bases théoriques plus sûres tous les essais de fertilisation.

Ces sols ont des caractéristiques physiques assez variables. En général leur structure est peu accusée dans l'ensemble du profil mais améliorée en surface par la pré-

sence de matière organique. Dans les horizons B les structures les plus fréquentes sont du type polyédrique fine à très fine (sols riches en sesquioxydes) rarement moyenne (sols à illite). Les structures massives sont fréquentes dans les sols appauvris ou lessivés, ainsi que dans les sols cultivés. On connaît encore mal les facteurs qui la régissent et son évolution sous l'action directe du soleil et de l'atmosphère sèche, lorsque, après défrichement, le sol est nu et peu couvert. En dehors des structures les plus fines dues à la présence de pseudo-particules, on a peu étudié les liaisons entre les observations microscopiques et la structure vue à l'œil nu.

La plupart de ces sols sont très friables, la teneur en fer libre paraissant en être un des facteurs essentiels. La porosité faible, caverneuse ou tubulaire, dans les sols appauvris ou lessivés est meilleure dans l'ensemble des sols ferrallitiques ; elle peut y être nettement plus élevée dans le sens latéral que vertical, surtout dans certains horizons de faible profondeur et varier avec le climat (Humbel, 1974). Dans le cas d'horizon B compact, la pénétration de l'eau de pluie en profondeur diminue nettement (Roose, 1973, 1977). La réserve en eau utile est souvent faible dans la plupart de ces sols à argile kaolinique peu expansible et à pseudo-particules (Martin, 1968). Par contre les andosols, bien que rares en Afrique (Sieffermann, 1973) ont, en raison de leur richesse en argile amorphe (allophane), de bonnes caractéristiques physiques très favorables au développement des végétaux.

Les propriétés chimiques diffèrent largement d'un type de sol à l'autre. Si les andosols sont riches en azote facilement disponible pour la végétation, les sols ferrallitiques en sont moins bien pourvus et encore moins les sols lessivés et appauvris (de Boissezon *et al.*, 1973).

La teneur et les formes du phosphore dans ces sols ont donné lieu à de nombreux travaux (Culot et Laudelout, 1957 ; Aubert, 1961 ; Bouyer et Damour, 1964 ; Dabin, 1967-1970 ; Roche, 1967 ; Pichot *et al.*, 1972). Sa dynamique dans des milieux souvent si riches en sesquioxydes de fer et d'aluminium est particulièrement complexe, allant jusqu'à la formation de phosphates de fer inclus, particulièrement inutilisables par les plantes. Les transformations des diverses formes les unes dans les autres ne sont encore que partiellement connues. Cet élément est aussi fortement fixé dans les andosols. Peu de recherches de base ont été consacrées à ce problème en Afrique.

Les bases alcalines et alcalino-terreuses sont bien représentées dans les sols lessivés des zones à saison sèche, tandis que leur teneur et répartition sont très variables dans les sols ferrallitiques (de Boissezon, 1970 ; Martin, 1973, 1977).

Il en est de même de beaucoup d'oligo-éléments (Hervieu et Nalovic, 1965 ; Aubert et Pinta, 1971 ; Nalovic et Pinta, 1972). Leur dynamique dans ces sols est encore insuffisamment connue. Celle du bore, ses interactions avec divers éléments et la matière organique ont été spécialement étudiées à Madagascar (Oliver *et al.*, 1974).

L'appréciation des potentialités des sols et de leur

fertilité résulte surtout des études sur les écosystèmes forestiers transformés par l'homme soit pour mettre en place des cultures pérennes, soit pour entreprendre des cultures annuelles vivrières d'exploitation. Il convient de prendre en considération les données accumulées dans ces divers cas, car les risques de transformation du sol lors du défrichement ou de l'aménagement des forêts sont parfois suffisamment importants pour justifier une large diffusion des connaissances acquises. Des travaux sur la comparaison des sols sous forêt et savane et sous culture ont été effectués dans un certain nombre de régions (Bartolomew *et al.*, 1953 ; Laudelout, 1954 ; Pernet, 1954 ; Berlier *et al.*, 1956 ; Fauck, 1956 ; Bocquet *et al.*, 1961 ; Berger, 1964 ; Martin, 1968 ; Brams, 1971, 1973 ; Le Buanec, 1972, 1981 ; Morel *et al.*, 1972 ; Sibon, 1972 ; de Blic, 1973 ; Godefroy, 1974 ; Ollagnier *et al.*, 1978 ; Valentin, 1978), mais leur interprétation d'ensemble est encore délicate et de nombreux problèmes sont encore à résoudre.

Facteurs physiques de la fertilité

Profondeur du sol et différenciation des horizons

Les inconvénients que représentent pour l'enracinement des cultures une profondeur de sol utile insuffisante et la présence d'horizons pédologiques très différents les uns des autres (horizons graveleux, hydromorphes, trop argileux, légèrement indurés ou stériles) ont été étudiés par Culot et Van Wambeke (1958) ; Dugain (1960) ; Berger (1964) ; Catherinet (1965) ; Dabin (1964) ; Godefroy (1969) ; Latham (1971), entre autres, mais beaucoup plus pour les plantes pérennes que pour les cultures vivrières. Il semble que le sous solage, associé si nécessaire au drainage, remédie à la plupart des difficultés aussi bien pour les cultures que pour les plantations forestières. Ceci n'est pas vrai lorsqu'il s'agit de gravillons ou d'horizons stériles.

Texture

De très nombreux auteurs ont cherché à discerner le rôle de la texture sur le rendement des plantes cultivées. A l'exception de certaines espèces (arachides, plantes à tubercules qui préfèrent les sols relativement légers), on conclut habituellement à une certaine indifférence de la plante, sauf aux textures extrêmes, très sableuses ou très argileuses. Toutefois, surtout lorsque les conditions climatiques ne sont pas optimales pour une plante donnée, on souligne volontiers l'importance de la texture pour l'alimentation hydrique des cultures de rente. (Culot et Van Wanbeke, 1958 ; Frankart et Croegaert, 1959 ; Ochs et Olivin, 1965 ; Latham, 1971). Il semble que peu de travaux existent pour les plantes vivrières. Par contre, l'évolution de la texture au cours des successions culturales a fait l'objet d'un certain nombre d'observations que l'on peut résumer en disant qu'elle est apparemment stable sauf en cas d'érosion différentielle (Le Buanec, 1972, 1981 ; Morel et Quantin, 1972 ; Roose, 1973).

Structure

Les sols des régions tropicales humides ne posent des problèmes de structure qu'en cas de disparition de la végétation de forêt ou de savane qui les protège de l'alternance des fortes dessiccations en saison chaude et sèche et de la battance des pluies en saison humide.

Bien qu'il y ait eu quelques études anciennes, les travaux sur la structure n'ont pratiquement débuté qu'à partir de 1960 avec l'application aux sols tropicaux de l'indice de Hénin (Combeau et Monnier, 1961 ; Hénin, Gras et Monnier, 1969, 2^e édition) ou modifié (Dabin, 1964 ; Latham, 1971) ; un indice simplifié est également utilisé à Madagascar (Ngo Chan Bang, 1968).

Un certain nombre de travaux (Boyer et Combeau, 1960 ; Combeau et Quantin, 1963 ; Martin, 1963 ; Casabianca, 1967 ; Richard, 1967 ; Babalola *et al.*, 1972 ; Le Buanec, 1972 ; Morel et Quantin, 1972) ont permis de se rendre compte de l'affaiblissement de la stabilité structurale du sol après une succession de cultures et du rôle joué par la jachère et les enfouissements de matière organique (engrais vert, jachère herbacée, résidus de récolte) dans sa reconstitution et son maintien. Toutefois, malgré quelques expériences prometteuses (Le Buanec, 1972 ; Morel et Quantin, 1972, 1981) on connaît encore assez mal, selon le type de sol, le niveau admissible de structure compatible avec un bon rendement. On ignore à peu près tout de l'influence du pâturage, des jachères naturelles ou artificielles sur la structure. Cependant des études très poussées sont en cours en Côte-d'Ivoire, au centre de l'ORSTOM à Adiopodoumé sur les relations entre les cultures et les formes d'exploitation des sols par les enracinements.

On sait que la structure des sols ferrallitiques acides est conditionnée principalement par la présence de matière organique et de fer (dit libre) et fort peu par le calcium (Combeau et Quantin, 1963 ; Martin, 1968) ; le rôle des diverses fractions de la matière organique commence à être quelque peu connu. On peut donc envisager des améliorations par emploi d'amendements organiques ; par contre, on ne voit absolument pas comment utiliser, dans la pratique courante, cet élément essentiel de la structuration qu'est le fer.

Des travaux récents portant sur l'observation et l'étude macro- et micromorphologique de la surface et des premiers centimètres du sol (de Blic, 1973 ; Beaudou *et al.*, 1978 ; Moreau, 1978 ; Valentin, 1978 ; Collinet et Valentin, 1979) ont permis de préciser davantage, aussi bien en condition naturelle qu'artificielle (culture mécanisée), les conditions du maintien d'une bonne structure des horizons de surface, si strictement liée à l'hydrodynamique de ces sols et à leur résistance à l'érosion (Roose, 1981).

Porosité et perméabilité

Les sols ferrallitiques ont, à l'état vierge, une porosité de leur partie superficielle satisfaisante, et elle se conserve assez bien sous cultures ; de ce fait, sous réserve d'une texture et d'une structure favorables, la qualité de la porosité ne pose habituellement pas de problèmes dans

le cas des cultures pérennes et lors de quelques années de cultures sarclées. Toutefois, dans le cas de rotation culturale dépassant 2 ans, on assiste à une baisse de la porosité et surtout de la macroporosité qui conditionne la perméabilité (Boyer et Combeau, 1960 ; Morel et Quantin, 1972) ; des enfouissements de matière organique (fumier de ferme, résidus de récolte) les restaurent sinon totalement du moins à un niveau apparemment acceptable.

Des recherches plus récentes (Humbel, 1974, 1976) sur la porosité et la perméabilité et leurs variations saisonnières et climatiques ont permis d'affiner la connaissance de ces caractéristiques pour une gamme variée de sols ferrallitiques du Cameroun : les résultats, obtenus en conditions naturelles, permettent de mieux savoir ce qui peut se passer en conditions artificielles (culture mécanisée ou non).

Propriétés hydrodynamiques

La grande majorité des sols ferrallitiques sont connus pour avoir une perméabilité élevée et quand celle-ci varie ou diminue en condition artificielle c'est le signe d'une dégradation du sol en surface ou en profondeur : la dynamique de l'eau dans le sol est alors modifiée et ainsi réunies les conditions pour une érosion superficielle plus ou moins importante. Aussi la connaissance de l'hydrodynamique des toposéquences ferrallitiques en milieu naturel ou cultivé a-t-elle fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années en vue d'applications plus ou moins immédiates dans l'utilisation agricole des sols (Bertrand, 1967 ; Roose, 1973 ; Talineau et Roose, 1973 ; Huttel, 1975 ; Lal, 1975, 1976 ; Lafforgue et Naah, 1976 ; Bois *et al.*, 1978 ; Poss, 1978 ; Colinet et Valentin, 1979 ; Roose, 1981). Les recherches dans ce domaine sont cependant à poursuivre et à affiner.

Facteurs chimiques de la fertilité

Les conditions d'une permanence de la fertilité en cultures pérennes ont été suffisamment étudiées et définies en Afrique francophone pour que l'on puisse conclure à la possibilité de cultiver, sinon indéfiniment, du moins sans échéance prévisible à l'échelle humaine, les divers sols des écosystèmes forestiers (andosols, sols ferrallitiques, sols hydromorphes), tout en leur conservant une fertilité proche de celle qu'ils avaient avant défrichage et même parfois supérieure, sous réserve d'apports minéraux pour compenser les pertes (exportations et lixiviation) et accroître les rendements (Deuss, 1967 ; Py, 1963 ; Martin Prevel, 1969 ; Godefroy, Lecocq et Lossois, 1969 ; Ollagnier et Ochs, 1973).

Il n'en est pas de même en cultures annuelles, où le sol est beaucoup plus sollicité et l'état des connaissances doit être envisagé pour chacun des différents facteurs de la fertilité.

Matière organique, azote et soufre

Tous les expérimentateurs confirment qu'après défrichage et mise en culture le taux de matière organique du

sol baisse fortement, des pertes de 20 à 35 % lors de la première année n'ayant rien d'exceptionnel (Fauck *et al.* 1969 ; Charreau et Fauck, 1970 ; Bouchy, 1973 ; de Blic, 1973 ; Moreau, 1978). Puis les teneurs en matière organique décroissent moins vite et à partir de la 5^e année, tendent à se stabiliser au moins dans certains cas (Richard, 1967 ; Le Buanec, 1972) ; on observe parfois encore une décroissance appréciable à la 9^e année de culture (Bouchy, 1973). La décomposition de cette matière organique se modifie également (Fauck *et al.*, 1969). par augmentation relative des fractions les moins polymérisées.

Quant à l'azote, il apparaît que l'on connaît au moins dans ses grandes lignes son évolution dans le sol (minéralisation de la matière organique, ammonification et nitrification), apparemment de façon plus complète en zone tropicale à saison sèche bien tranchée qu'en zone équatoriale humide (Jacquemin et Berlier, 1956 ; Dommergues, 1960 et 1962 ; Fauck, Moureaux et Thomann, 1964). On commence également à avoir des notions assez nettes sur la fixation symbiotique d'azote par les *Rhizobium* légumineuses (Dommergues, 1967) estimée suivant les cas entre 10 et 200 kg/ha, habituellement 50 à 100 kg/ha. Il semble que les principaux besoins en matière de recherches soient les suivants, étant donné l'insuffisance assez générale de l'azote fourni par le sol :

Possibilité de stimuler la fixation dans le sol d'azote atmosphérique par les bactéries non symbiotiques aérobies et anaérobies ;

Teneur et nature de la matière organique pour fixer, au moins momentanément, le plus possible d'azote sous forme organique ou ammoniacale, à défaut des nitrates dont l'existence est trop fugace ;

Expérimentation en milieu tropical des ralentisseurs de nitrification, qu'il s'agisse de procédés physiques (enrobage ou compactage des granulés d'engrais) ou biochimiques (substances inhibitrices de la nitrification).

Soufre

On sait depuis une vingtaine d'années qu'un certain nombre de sols tropicaux sont relativement carencés en soufre (Hesse, 1957 ; Braud, 1964 ; Forestier *et al.*, 1966 ; Charpentier, Martin et Prevel, 1965 ; Dabin, 1970 ; Ollagnier et Ochs, 1972). On sait empiriquement remédier à ces carences, en général par apport de sulfate d'ammoniaque. Ce n'est qu'assez récemment (Dabin, 1970) que la nature organique des réserves en soufre a été démontrée et qu'on a précisé les teneurs relatives et absolues de cet élément compatibles avec une croissance normale des plantes. Dans l'ensemble ces connaissances sont récentes et cachent mal un certain nombre de points obscurs :

Pourquoi les carences en soufre sont-elles fréquentes en savane et rares sous forêt ? est-ce dû à une nature particulière de la matière organique ou bien à une vitesse de minéralisation différente dans les deux milieux ?

Les carences en soufre s'atténuent après 2 ou 3 ans de culture, mais au détriment des réserves ; jusqu'à

quel niveau peut-on aller sans craindre un épuisement irréversible ;

La dynamique du soufre dans les sols est actuellement assimilée sans doute sommairement à celle de l'azote. Pourtant il semble que l'anion SO_4^{--} peut se fixer sur les colloïdes, en particulier dans les andosols. Quelles sont les formes de mise en réserve du soufre ?

Phosphore

Le problème du phosphore est peut-être l'un des plus difficiles auquel se heurtent les agronomes et les chimistes du sol travaillant en pays tropicaux. De très nombreuses méthodes sont utilisées pour l'analyse du phosphore et la comparaison des résultats est délicate. Les sols sont souvent relativement pauvres en phosphore dit total et les dosages de phosphore dénommé assimilable donnaient jusqu'à une date relativement récente des résultats difficilement interprétables (Culot et Laudelout, 1957 ; Bouyer et Damour, 1964 ; Enwezor *et al.*, 1966 ; Bouyer, 1967 ; Dabin, 1967, 1971 ; Roche, 1967 ; Bouchy, 1970) ; cependant les carences et déficiences en phosphore viennent en importance immédiatement après celles de l'azote (Chaminade, 1968). On connaît encore mal le devenir des engrais phosphatés dans les sols tropicaux souvent riches en hydroxydes et oxydes de fer et d'alumine dont la capacité de rétention ou rétrogradation pour le phosphore immobilise cet élément avec une force telle que les plantes l'utilisent mal et que l'effet résiduel de l'engrais ne dépasse pas en général 2 ans (Forestier, 1960 ; Braud, 1967), malgré une lixiviation négligeable.

Un grand nombre de méthodes de dosage du phosphore assimilable sont disponibles. Les méthodes isotopiques donnent souvent de bons résultats (Pichot et Roche, 1972 ; Truong *et al.*, 1973 ; Pichot *et al.*, 1978), mais elles ne sont pas toujours aisées à mettre en œuvre surtout en pays tropicaux ; aussi préfère-t-on souvent les méthodes chimiques (Dabin, 1964 ; Roche, 1967 ; Latham, 1971) plus simples et plus rapides, mais qui devraient certainement être améliorées. Une comparaison récente (Roche *et al.*, 1980) de nombreuses méthodes sur des sols variés a permis de clarifier le problème et tout au moins d'améliorer l'interprétation des résultats de certaines méthodes, en les mettant plus directement en liaison avec les besoins réels en phosphore des plantes.

Le problème de l'inassimilabilité progressive du phosphore par les sesquioxides du sol a fait l'objet de nouvelles études qui expliquent un peu mieux le phénomène (Dabin, 1970 ; Pichot, Truong et Burdin, 1973). Le passage inverse à une forme assimilable paraît maintenant possible sous l'influence de chélatants, dont le plus aisé à mettre en œuvre est la matière organique. Cependant des problèmes théoriques concernant la chimie du phosphore en sols tropicaux et pratiques concernant la fertilisation phosphatée sont encore à résoudre.

Cations alcalins et alcalino-terreux

Les teneurs favorables aux cultures sont assez bien connues. Ainsi, en ce qui concerne le potassium échangeable du

sol, on connaît relativement bien les teneurs minimales et parfois optimales pour un certain nombre de cultures (Boyer, 1972) ainsi que les conditions d'emploi des engrais potassiques. Pour le magnésium, quelques travaux (Py, 1963 ; Celton, Roche et Vely, 1973 ; Pichot, Truong et Burdin, 1973) ont mis en évidence les seuils de carence et de déficience dans le cas de certaines cultures. Enfin quant au calcium, on s'accorde à reconnaître la nécessité d'un certain niveau calcique minimal pour l'arachide (Fauck, 1956 ; Bonnier, 1957 ; Martin, 1964) ou, au contraire, la nocivité de quantités élevées (Culot et Van Wambeke, 1958).

Un certain nombre de données éparses dans la littérature ont été recueillies sur les équilibres potassium-calcium-magnésium dans le sol (Boyer, 1978). Mais les connaissances restent très insuffisantes. Les pertes en cations dans les sols cultivés ont été évaluées de manière très incomplète. Comme dans les pays tempérés, on n'a souvent envisagé que le potassium. Cependant de nombreux auteurs ont rendu compte d'une diminution considérable non seulement de l'ion potassium mais aussi de l'ion calcium (Roche et Vely, 1962 ; Charreau et Fauck, 1969 ; Bouchy, 1973 ; Celton, Roche et Vely, 1973), alors que dans d'autres cas cette dernière reste peu significative (Le Buanec, 1972). En fait, on connaît fort mal le pouvoir de régénération des sols tropicaux pour les cations échangeables sous cultures continues et sous jachères.

Assez largement expérimentés à Madagascar (Roche et Vely, 1972 ; Celton, Roche et Vely, 1973), les amendements calco-magnésiens sont peu utilisés sur cultures annuelles en Afrique centrale et occidentale, sans doute à cause de leur prix de revient (Martin, 1964). Il serait bon de déterminer à quel moment il devient nécessaire de fournir potassium, calcium et magnésium, compte tenu du pouvoir de régénération des éléments échangeables, du potentiel de fixation sur le complexe absorbant et des besoins des plantes.

Oligoéléments

Grâce à un certain nombre de travaux (Hervieu et Nalovic, 1965 ; Nalovic, 1969 ; Aubert et Pinta, 1971 ; Nalovic et Pinta, 1972), on commence à connaître les teneurs en oligoéléments des sols tropicaux, non seulement globalement mais aussi celles des fractions présumées assimilables.

En Afrique francophone humide, on s'est préoccupé des toxicités manganiques (Franquin, 1958 ; Bouchy, 1970 ; Celton, Roche et Velly, 1973) et surtout des carences en bore (Culot et Van Wambeke, 1958 ; Birot, 1967 ; Braud, Fritz, Megie et Quillon, 1969 ; Bouchy, 1970 ; Oliver *et al.*, 1974), en cuivre et en zinc (Loue, 1957 ; Moity, 1961 ; Py, 1963) en manganèse (Culot et Van Wambeke, 1958 ; Frankart et Croegaert, 1959 ; Fremont et Nucé de Lamothe, 1968, sur cocotier), en molybdène, en chlore (Ollagnier, 1973 ; Daniel et Manciot, 1973). Ces travaux se sont, en général, bornés à diagnostiquer les symptômes, le plus souvent par analyse foliaire, et à proposer des remèdes empiriques. A ce sujet, il serait

nécessaire de réaliser un gros effort de méthodologie analytique afin de pouvoir déterminer par des tests chimiques ou autres, les quantités et les formes de chaque élément nécessaires et suffisantes pour chaque plante et probablement par type de sol.

Un autre domaine important de recherche est la dynamique de ces éléments dans le sol : les travaux réalisés à Madagascar sur le bore (Oliver *et al.*, 1974), montrent que les schémas d'assimilabilité des oligoéléments basés sur le pH sont insuffisants pour expliquer la nutrition des plantes en éléments mineurs, les interactions avec d'autres éléments et la présence de matière organique pouvant avoir un rôle important et parfois prédominant.

Aluminium

La connaissance de la toxicité aluminique (Segalen, 1973 ; Pieri, 1974 ; Boyer, 1976) s'est améliorée et quelques travaux ont été réalisés pour sa correction (Celton, Roche et Velly, 1973 ; Trinh, 1976), mais les toxicités manganiques ont le plus souvent masqué les toxicités aluminiques. Ces dernières ne sont d'ailleurs apparues qu'après plusieurs cycles culturaux, alors qu'en fait peu de terres forestières très acides ont été mises en valeur sur de grandes surfaces : il y a donc encore un vaste domaine à explorer dans le cas des sols à bas pH.

Fer

On n'a signalé que très peu de cas de chlorose dus à une mauvaise assimilation du fer (Culot, Van Wambeke, 1958, au Zaïre ; Frémond, 1968, sur cocotiers). Par contre, plusieurs auteurs ont souligné l'importance pour la structure des sols des liaisons entre le fer et les colloïdes organiques et minéraux (Martin, 1963 ; D'Hoore, 1964, 1968 ; Chauvel, 1977). Jusqu'à présent on voit fort mal le moyen pratique de mobiliser le fer du sol pour éviter les dégradations de la structure qui se produisent lors des cultures. Mais il serait utile d'explorer un peu plus cette voie de recherche.

Silice

La silice, élément toujours abondant dans les sols, a surtout préoccupé les chercheurs par son omniprésence et sa dynamique (en particulier D'Hoore et Segalen en Afrique) et fort peu par ses incidences sur la fertilité. Toutefois, on a commencé à se préoccuper sérieusement à Madagascar de l'alimentation en silice du riz (Roche, Celton et Velly, 1971). Des travaux similaires seraient utiles en Afrique.

Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Les recherches pédologiques en Afrique humide ont porté sur des sujets variés, qu'il se soit agi d'expliquer la formation des sols ou d'étudier certaines de leurs caractéristiques ou leur évolution sous l'influence des cultures. C'est cependant ce dernier point qui est l'un des problèmes fondamentaux de la pédologie tropicale : la transformation radicale des propriétés physico-chimiques des sols, lorsque ceux-ci sont mis en culture, nécessite aussi bien

la connaissance des conditions de départ que le suivi de l'évolution de celles-ci.

Dans le domaine physique le point principal concerne les relations sol-eau- plante et il est nécessaire de poursuivre les études dans les domaines suivants :

Caractéristiques hydrodynamiques des sols et des topographies, liées aux principales propriétés physiques des sols (structure, porosité, perméabilité) ;

Étude des caractéristiques de surface des sols et de leur évolution (dégradation, amélioration) en liaison avec les processus de ruissellement et d'érosion.

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

Poursuite de l'étude de la matière organique et en particulier :

- Rôle des différentes fractions sur la structure ;
- Dynamique de l'azote organique ;
- Dynamique du soufre organique ;

Poursuite de l'étude de la fixation du phosphore dans les sols riches en hydroxydes de Fe et Al ;

Étude des fractions du phosphore du sol directement assimilable par les plantes ;

Étude du potassium du sol : fixation sur le complexe absorbant, dynamique du potassium dans les écosystèmes cultivés en liaison avec la fertilisation ;

Étude des antagonismes entre cations et des équilibres pour la nutrition des plantes ;

Correction de l'acidité du sol et les problèmes liés à la présence d'aluminium échangeable ;

Statut des oligo-éléments dans le sol : déficiences, toxicités.

Érosion

Introduction

En Afrique tropicale humide, le sol est bien protégé des pluies violentes grâce à la couverture forestière. Tant que la population ne dépasse pas 20 à 40 hab/km², la culture itinérante (courte période d'exploitation intense sur brûlis, suivie d'une longue jachère forestière) de plantes associées permet d'assurer un certain équilibre. Mais avec l'augmentation de la population, son regroupement dans des centres administratifs et l'extension des cultures de rente, les sols ont été surexploités, les défrichements ont été étendus et mécanisés, la durée de la jachère a été réduite et de graves problèmes d'érosion sont apparus localement.

Devant l'échec trop souvent constaté de la mécanisation de l'agriculture en milieu tropical, les agronomes accusèrent la fragilité des sols tropicaux avant d'adapter aux conditions écologiques locales les techniques culturales mises au point en régions tempérées où les pluies sont beaucoup moins agressives.

Pour mieux comprendre l'influence relative des facteurs et les conditions de l'érosion, les chercheurs ont appliqué à l'Afrique de l'Ouest (Roose, 1973, 1976 ;

Lal, 1975) l'équation empirique de prévision de l'érosion développée pour Wischmeier et Smith entre 1959 et 1978 et par une équipe de chercheurs du Service de conservation des sols américain à partir de plus de 10 000 résultats annuels de mesures sur parcelles et petits bassins versants. Cette équation

$$E = R.K.SL.C.P$$

signifie que les pertes en terre (E en t/ha/an) sont une fonction multiplicative de l'agressivité des pluies (R), de la résistance du sol (K), de la topographie (SL), de la couverture végétale et des techniques culturales (C) et des pratiques antiérosives (P).

Causes de l'érosion

L'érosion éolienne ne peut se développer qu'en zone aride à saisons contrastées (au nord du 12^e parallèle en Afrique de l'Ouest). Par ailleurs, deux écoles se sont affrontées pour définir le principal responsable de l'érosion hydrique.

Pour les uns (dont Bennet, 1939), seul le ruissellement est capable de causer le ravinement qui est à l'origine des manifestations les plus spectaculaires de l'érosion ; la majorité des ouvrages antiérosifs sont donc destinés à freiner le ruissellement ;

Pour les autres, le ruissellement n'est qu'une conséquence de la dégradation des sols par la battance des pluies. Depuis Ellison (1945), on sait qu'en interceptant l'énergie des gouttes de pluie, on supprime les phénomènes d'érosion à leur origine. Hudson (1973) a montré en Rhodésie qu'une simple toile moustiquaire interceptant les gouttes réduit l'érosion au 1/100 de celle observée sur parcelle nue voisine. Dabin et Leneuf (1958) puis Roose (1973, 1981) en Côte-d'Ivoire ont prouvé qu'un paillis d'un centimètre d'épaisseur est aussi efficace qu'une forêt de 40 m de haut pour supprimer le ruissellement et l'érosion. Cependant, là où l'érosion linéaire domine l'énergie du ruissellement peut entraîner le ravinement et l'humidité du sol peut provoquer des mouvements de masse sur les versants instables.

Aux États-Unis d'Amérique, Wischmeier (1960) a proposé un indice d'agressivité des pluies ($R = EI_{30}$) qui tient compte à la fois de l'énergie cinétique des gouttes (force de détachement) et de l'intensité maximale des pluies pendant 30 minutes (saturation du sol). Cet indice varie en moyenne annuelle de :

- 50 à 600 aux États-Unis d'Amérique,
- 20 à 150 en climat tempéré océanique (Laurant et Bolline, 1978),
- 50 à 350 en zone méditerranéenne (Kalman, 1967 ; Masson, 1971),
- 200 à 600 en zone tropicale sèche (Roose, 1976),
- 500 à 1 500 en zone tropicale humide (Roose, 1976),
- et jusqu'à 2 000 en région subéquatoriale en bordure du golfe de Guinée (Roose, 1973).

Les pluies sont donc extrêmement agressives dans les régions tropicales humides forestières.

Facteurs modifiant l'érosion potentielle

Ces facteurs de résistance du milieu à l'agressivité des pluies sont par ordre décroissant d'importance le couvert végétal et les techniques culturales, la pente, l'érodibilité des sols et les techniques antiérosives.

Couvert végétal et techniques culturales

Tant que le sol est complètement couvert, le ruissellement ($KR = 0,5$ à 5 % des pluies) et l'érosion (10 à 200 kg/ha/an) restent négligeables qu'il s'agisse d'une culture paillée, d'une savane dense non brûlée ou à fortiori d'une forêt tropicale. Plus la litière et le sous-bois sont épais et moins les gouttes (qui sous forêt ont tendance à se regrouper pour en former de plus grosses, donc plus dangereuses) ont de chance de battre la surface du sol et de disperser les agrégats (voir tableau 2). La mésosofaune (rats, termites, fourmis, vers de terre et les fousseurs en général) joue un rôle important ; d'une part, en perforant la surface du sol, elle améliore l'infiltration des eaux de pluies et réduit le ruissellement, mais d'autre part, elle ramène au-dessus de la litière protectrice des éléments terreux dénudés qui, soumis à la battance des pluies, sont à l'origine des horizons sableux superficiels et du recul des versants dans les zones bien protégées (Roose, 1976, 1981). De faibles pertes en terre sous forêt ont été observées non seulement en Afrique (Roose, 1973-1981) mais aussi en Guyane française, $0,4$ t/ha à la Crique Grégoire, $0,2$ à 1 t/ha/an sur les schistes de Bonidoro (Projet ECEREX), moins de 1 t/ha/an sur sol volcanique à Java (Gonggrijp, 1941) et à Madagascar (Perinet) (Bailly *et al.*, 1974). Dans les forêts tempérées des États-Unis d'Amérique, l'érosion serait encore plus faible ($E \leq 0,01$ t/ha/an) (Bennett, 1939) ce qui s'expliquerait d'une part par des pluies moins agressives et d'autre part par des litières de débris végétaux plus épaisses et plus durables qu'en zone tropicale humide. Les formes les plus spectaculaires de l'érosion sous forêt sont les glissements de terrain dont l'extension est strictement limitée aux situations qui conjuguent à de fortes pentes des sols comportant un horizon imperméable servant de plan de glissement lorsque les horizons superficiels sont saturés, par exemple dans la bordure de la lagune Ebrié en Côte-d'Ivoire). L'examen des profils pédologiques laisse également penser que la reptation du sol peut (ou a pu) se produire sous forêt. Le rabotage des filons de quartz à un certain niveau des profils semble en fournir la preuve (Fournier, 1958) mais la mesure de ces mouvements en masse est actuellement très délicate (Rougerie, 1960).

Ce n'est qu'au cas où l'écosystème forestier est détruit que l'érosion s'accélère pour atteindre des valeurs catastrophiques (quelques dizaines ou centaines de tonnes/ha/an en fonction de la pente et de l'érodibilité du sol) si le sol est mal couvert durant les périodes où les pluies sont les plus agressives. Le ruissellement peut alors dépasser 25 à 40 % l'an et jusqu'à 80 % lors des plus fortes averses.

Certaines cultures ont la réputation d'être protectrices car elles recouvrent rapidement le sol ; c'est le cas des cultures forestières (palmier, hévéa, citrus, caféier, cacaoyer, qui acceptent un sous-bois ou des plantes de

couverture), des pâturages non dégradés, de la canne à sucre, des cultures fourragères.

D'autres au contraire sont soupçonnées d'être dégradantes, soit que leur croissance soit assez lente (ex. légumineuses, manioc) soit qu'elles soient associées à des techniques culturales qui laissent le sol à découvert pendant les périodes fortement arrosées. C'est le cas du tabac, du coton, de l'arachide, du maïs et du sorgho semés à faible densité.

En réalité, l'adaptation des techniques culturales à l'agressivité du climat permettrait de classer la plupart des plantes cultivées comme plus ou moins protectrices du sol : la densité et la précocité de la plantation, le travail du sol et une fertilisation bien adaptés ainsi que l'aménagement des résidus de culture ou l'appoint éventuel d'un paillage jouent un rôle prépondérant sur les phénomènes d'érosion.

En comparant les pertes en terre sur parcelle cultivée à celles observées sur sol nu, on peut calculer le coefficient C de l'équation de Wischmeier et Smith, lequel traduit l'efficacité du couvert végétal et des techniques culturales utilisées. Ce facteur est de 1 sur sol nu et varie de 1 à $0,1$ sous culture sarclée, de $0,1$ à $0,01$ sous prairie et cultures forestières à sous-étage, de $0,01$ à $0,001$ sous forêt et sous culture paillée.

Les feux de brousse ont un rôle indirect sur l'érosion en savane. Non seulement les incendies empêchent la régénération des arbres et appauvrissent la flore et la faune, mais ils minéralisent brutalement les matières végétales produites, dénudent le sol, diminuent le taux de matières organiques du sol et les activités biologiques (en particulier les vers de terre) et de ce fait, favorisent la dégradation de la structure des horizons superficiels, augmentent substantiellement le ruissellement et les risques d'érosion, comme le montre le tableau 3.

TABLEAU 3. Érosion et ruissellement observés à Gonse, en Haute-Volta (Roose, 1978). Pente = $0,5$ %

	Protection intégrale	Feux précoces	Feux tardifs
Ruissellement			
KRAM * %	0,3 %	3 %	15 %
KRMAX ** %	1 %	10 %	50 à 73 %
Érosion kg/ha/an	30	150	400

* KRAM = coefficient de ruissellement annuel moyen exprimé en % des pluies.

** KRMAX = coefficient de ruissellement maximal observé au cours de l'averse de fréquence annuelle.

Les résultats des mesures de Collinet et Asseline en forêt de Taï (1980) (projet MAB en basse Côte-d'Ivoire) prouvent que si le ruissellement et l'érosion croissent après défrichement d'une forêt dense humide, cette croissance est limitée les premières années en cas de culture traditionnelle lorsque la litière, le réseau racinaire et les horizons humifères sont respectés. Ceci n'est pas le cas en culture mécanisée (cf. Séfa en Casamance) où toutes les grosses racines et les souches sont extirpées tandis qu'une partie des

TABLEAU 2. Ruissellement (en % des pluies annuelles ou des pluies unitaires) et érosion (t/ha/an) en Afrique de l'Ouest sous végétation naturelle, cultivée ou sur sol nu travaillé

STATIONS	Pente %	Ruissellement annuel moyen %			Ruissellement maximum journalier %			Érosion (t/ha/an)			Sources
		milieu naturel	sol nu	culture	milieu naturel	sol nu	culture	milieu naturel	sol nu	culture	
<i>Adiopodoumé</i> : ORSTOM, 1954-1975. Forêt dense sempervirente second. Pluie = 2 100 mm. en 4 saisons Ferrallitique sur sables III	4,5 7 11 20 65 29	— 0,1 0,3 0,5 1,2 —	35 33 — 24 — —	— 0,5 à 30 — — hévée 0,3 à 1 Md = 0,5	— 0,7 1,3 3,2 12 —	98 95 — 76 — —	— 60-87 — — hévée 2 à 4 Md = 2,2	— 0,017 0,034 0,052 0,455 —	60 138 — 570 — —	— 0,1-100 — — hévée 0,06 à 3 Md = 0,2	Roose, 1973-1979 Roose, 1970
<i>Azaguie</i> : IRFA-ORSTOM, 1966-1974 Forêt dense sempervirente Pluie = 1 750 mm. en 4 saisons Sol ferrallitique sur schistes Chloriteux	14	0,4 à 5,5 Md = 2	— —	banane 5,5 à 12 Md = 9	3 à 39 Md = 14	—	banane 25 à 74 Md = 60	0,05-1,4 Md = 0,15	—	banane 0,7-4,5 Md = 1,8	Roose et Godefroy, 1977
<i>Divo</i> : IFCC-ORSTOM, 1967-1974 Forêt dense semi-décidue Pluie = 1 450 mm. en 4 saisons Sol ferrallitique sur granite	10	0,5 à 1,4	—	cacao 0,3-0,4	3 à 6	—	cacao 1 à 2,4	0,1 à 0,6	—	cacao 0,06-0,1	Roose, Jadin, 1970-1979
<i>Bouaké</i> : IRAT-ORSTOM, 1960-1973 Savane arbustive dense Pluie = 1 200 mm. en 4 saisons Sol ferrallitique sur granite	4	Pro. 0,03 FP. 0,23	15-49	0,1 à 26	Pro. 0,2 FP. 1	40 à 70	5 à 65	Pro. 0,001 PF 0,050	11 à 52	0,1 à 26	Kalms, 1975 Bertrand, 1967 Roose et Bertrand, 1972 Berger, 1964
<i>Korhogo</i> : ORSTOM, 1967-1974 Savane arbustive claire dégradée Pluie = 1 400 mm. en 2 saisons Sol ferrallitique sur granite	3	FP. 1 à 5 Md = 3,0	25-40 Md = 33	—	8 à 30 Md = 19	67 à 89	—	0,01-0,160 Md = 0,110	3 à 9 Md = 4	—	Roose, 1975-1979
<i>Saria</i> : IRAT-ORSTOM, 1971-1974 Savane arborée claire à épineux Pluie = 850 mm. en 2 saisons Sols ferrugineux sur cuirasse peu profonde	0,7 1,7	Pro. 5-8 Pat. 10 Pro. 0,4	35 à 43	10 à 37	Pro. 20-30 Pat. 41 Pro. 1 à 8	69-71	40 à 65	Pro. 0,2-0,7 Pat. 0,17 Pro. 0,10	14-35 Mo = 20	3-14 Mo = 7,3	Arrivets, 1973 Roose <i>et al.</i> , 1974-1979
<i>Gonsé/Campela</i> : CTFT-ORSTOM, 1967/1974 Savane arborée claire à épineux Pluie = 850 mm. en 2 saisons Sols ferrugineux trop. indurés sur granite < en profondeur en surface	0,4 0,8	Pro. 0,2 FP 2,5 PT 15	—	—	Pro. 1 FP. 8-10 FT. 50-70	—	—	Pro. 0,02-0,05 FP. 0,05-0,15 FT. 0,41	—	—	Roose et Birot, 1970
<i>Séfa</i> (Sénégal) : IRAT-ORSTOM, 1954-1963 Forêt sèche claire Pluie 1 300 mm. en 2 saisons Sol ferrugineux tropical lessivé à taches sur granite	1 à 2	Pro. 0,1-1,2 PF 0,3-1,5	25 à 55	8 à 10	—	—	—	Pro. 0,02-0,2 FP. 0,02-0,5	30 à 55	2 à 20	Roose, 1967 Charreau, 1972
<i>Agonkamey</i> (Dahomey) : ORSTOM, 1964-1969 Fourré dense Pluie 1 300 mm. en 4 saisons Sol ferrallitique/sables III	4,4	0,1 à 0,9	après défrichement 17	20 à 35	2,5	69	70-80	0,3 à 1,2	17 à 28 après défrichement	10 à 85	Verney Volkoff et Willaime, 1967 Roose, 1973-1976
<i>Ibadan</i> (Nigéria) IITA 1972-1973 Savane arbustive dense Pluie 1 200 mm. en 4 saisons Sol ferrallitique/granite	1 5 10 15	— — — —	31-58 38-62 36-57 30-57	0,1-15 3,2-36 3,4-26 2,9-25	— — — —	70-89 70-100 80-94 70-88	20-40 40-50 40-70 30-60	— — — —	5-10 43-156 59-233 116-229	0-1,6 0,1-11 0,1-7 0,1-43	Lal, 1975

Pro = protection intégrale ; FP = feux précoces ; FT = feux tardifs ; Md = médiane ; Mo = moyenne arithmétique ; Pat = pâturage extensif.

horizons humifères est pulvérisée ou même (pire) décapée.

Si donc la dégradation de certaines propriétés du sol est inéluctable du fait de la déforestation et de la culture, la vitesse et l'amplitude de cette dégradation (donc des risques d'érosion) dépendent des techniques utilisées et des cultures introduites. Sous cacaoyère (Roose, 1981) et palmeraie (Olivin *et al.*, 1978), le potentiel de fertilité du sol et les risques d'érosion ont peu varié après des défrichements progressifs. Par contre sous cultures sarclées après défrichement mécanisé, la dégradation du potentiel de fertilité est très sensible dès les premières années (de Blic, 1976 ; Moreau, 1978).

C'est le facteur de résistance du milieu le plus efficace (1 à 1/1 000) ; c'est sur lui et sur le changement de pente que vont s'appuyer les méthodes biologiques de lutte anti-érosives.

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

Travail du sol

Il est difficile de dissocier l'influence du couvert végétal de celle des techniques culturales généralement utilisées pour chaque type de plante. C'est pourquoi Wischmeier les a confondues dans le facteur *C*. On ne peut cependant ignorer le problème posé par le travail du sol. Celui-ci en effet augmente la porosité de l'horizon superficiel ainsi que l'infiltration des eaux de pluie et l'enracinement des plantes cultivées. Mais cet effet bénéfique est temporaire (environ 1 mois avec 100 à 150 mm de pluie) (Collinet et Valentin, 1979 ; Roose, 1981) et contrecarré par la diminution de cohésion du matériau (donc de sa résistance à l'érosion) et par le tassement des horizons sous-jacents. On trouve donc deux écoles. L'une estime qu'il faut y toucher le moins possible et préconise des adaptations des méthodes de minimum ou « zero tillage » des américains ou de « stubble mulching » (Lal, 1976). L'autre qui estime que l'amélioration de l'infiltration par le travail du sol est une des clés principales de l'intensification de l'agriculture : si la culture est correctement menée, il ne devrait pas y avoir d'augmentation de l'érosion (Charreau et Nicou, 1971).

Tout dépend probablement du climat et du type de sol étudié ainsi que de l'état initial du sol et des quantités de matières organiques dont on dispose pour maintenir une structure correcte de l'horizon superficiel. Il faut cependant souligner que l'utilisation très intensive des machines agricoles finit par détruire la structure de l'horizon superficiel (trop poudreux), par provoquer une épaisse semelle de labour difficile à détruire par sous-solage sans l'aide d'une prairie temporaire (2 ans) et que le gaspillage d'énergie se paye cher aujourd'hui. On recherche donc actuellement des

méthodes où le travail du sol est limité et confié en partie à l'activité de la faune et la flore (labour biologique par les vers, etc.).

Pente

Lorsque le sol n'est pas totalement couvert, l'influence de la pente se fait sentir vigoureusement sur l'érosion et quelquefois moins nettement sur le ruissellement. Les transports solides sont plus importants si la pente du versant est convexe que si elle est homogène ou, à fortiori, concave. L'influence de la longueur de la pente (*L*) n'est ni constante, ni très élevée. Théoriquement, le refus à l'infiltration s'accumule tout au long du versant, la vitesse et l'énergie du ruissellement s'accroissent ainsi que les risques d'érosion linéaire (rigoles, ravines). De là se justifient les méthodes qui visent à cloisonner le paysage et en particulier les terrasses de diversion. En réalité, les rares expérimentations montrent que l'érosion et le ruissellement ne croissent pas forcément tout au long du versant en raison des forces de frottement développées par la rugosité de la surface du sol, et des variations de propriétés des sols.

En revanche, l'influence de l'inclinaison de la pente sur l'érosion est généralement déterminante : les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente, mais l'exposant varie substantiellement (de 1,2 à 2,5 en Afrique) en fonction des techniques culturales, des types de sols et de l'état de leur surface (rugosité, battance, humidité) *. Il faut noter en outre que les phénomènes d'érosion peuvent se manifester sur des pentes très faibles, en particulier sur les sols ferrugineux tropicaux pauvres en matières organiques, riches en limons et sables fins et mal structurés : sur des champs de sorgho de moins de 1 % de pente, le ruissellement atteint 25 à 40 % des pluies et l'érosion dépasse 10 t/ha/an. Le ruissellement n'augmente pas nécessairement avec la pente : ainsi le ruissellement atteint couramment 25 à 40 % sur des pentes de moins de 1 % en zone sahélienne tandis qu'en moyenne sur 5 ans près d'Abidjan il a diminué de 35 % sur une parcelle nue de 4 % de pente, à 25 % sur une parcelle nue de 20 % de pente (Roose, 1973, 1980).

Érodibilité des sols

Vers les années 1950, des agronomes attirèrent l'attention sur l'ampleur des phénomènes d'érosion observés en région tropicale. En l'absence du couvert végétal, ces sols s'épuisent et sont ravagés par l'érosion, même sur des pentes faibles (cultures mécanisées d'arachide à Séfa au Sénégal). En réalité, si les réserves en matières organiques et en nutriments assimilables de ces sols s'épuisent rapidement en zone tropicale, leur résistance à l'agressivité mécanique des pluies varie beaucoup (Roose, 1981).

* A une équation exponentielle, Wischmeier a préféré une équation du second degré très voisine. Dans les conditions les plus courantes des plaines et collines cultivées en Afrique de l'Ouest, le facteur topographique (*S.L.*) varie de 0,1 à 5 (soit 1 à 50). Cela justifie pleinement les techniques anti-érosives qui tendent à aplanir progressivement les champs cultivés.

Pour isoler ce facteur de résistance du milieu qui dépend des propriétés intrinsèques du sol, Wischmeier a défini une parcelle de référence qui consiste en une jachère nue, travaillée dans le sens de la pente, sans apport de matières organiques pendant 3 ans.

Aux États-Unis d'Amérique ce facteur « K » augmente de 0,05 à 0,70 avec l'érodibilité des sols. Sur les sols bruns lessivés tempérés, il varie de 0,30 à 0,50. En Afrique de l'Ouest, il varie de 0,03 à 0,20 sur les sols ferrallitiques, 0,20 à 0,30 sur les sols ferrugineux tropicaux, autour de 0,10 sur les vertisols et autour de 0,02 sur les sols gravillonnaires en surface.

L'érodibilité des sols tropicaux augmente au cours de la saison des pluies et au fur et à mesure que les cultures se succèdent. Elle est souvent plus faible que celle des sols bruns lessivés tempérés et dépend essentiellement des taux de matières organiques et d'éléments grossiers dans l'horizon superficiel de la texture et de la structure des différents horizons. Plus la structure du sol est stable (matière organique, fer et alumine libre, calcium) et plus il est résistant aux pluies ; plus les sols sont pauvres en sables grossiers, mais riches en limons et sables fins et plus vite ils se colmatent et sont érodés.

Les sols tropicaux ne sont donc pas particulièrement fragiles mais l'agressivité des pluies est très élevée. Pour accroître encore leur résistance, il convient de leur restituer le maximum de matières organiques, d'éviter la formation de pellicules de battance par le travail du sol en grosses mottes ou par l'aménagement des résidus de culture (paillis).

Pratiques antiérosives

Les techniques uniquement destinées à lutter contre l'érosion des sols, comme le labour ou le billonnage isohypse, les terrasses, les fossés, les haies et les bandes d'arrêt, peuvent diminuer considérablement les pertes en terre. Ce facteur n'est donc pas négligeable, mais il apparaît clairement que la lutte mécanique contre l'érosion est beaucoup moins efficace que les méthodes biologiques qui favorisent la couverture végétale, diminuent la pente des versants et améliorent la structure du sol.

L'aménagement conservateur du milieu agricole peut s'organiser autour de trois thèmes :

1. Distribution des types de culture sur le terroir en fonction des risques de dégradation, des potentialités des sols et des travaux de mise en valeur à entreprendre ;
2. Fixation de l'exploitation agricole à l'intérieur de structures stables en courbes de niveau ;
3. Adoption des techniques culturales en vue de la conservation de l'eau et de la fertilité des sols.

En région tropicale, plus il fait humide et plus on a intérêt à faire appel à des méthodes biologiques (plantation hâtive et dense, fertilisation et travail du sol bien adapté au milieu, restitution importante de résidus de culture). En zone tropicale sèche, il faut favoriser l'infiltration totale des eaux de pluie et traiter les champs comme des casiers chaque fois que la topographie le permet. Enfin plus le

climat est aride et plus il faut faire appel à des moyens mécaniques (terrasses et labour profond) pour pallier aux déficiences du couvert végétal. Donc, en zone forestière, les techniques biologiques sont les plus efficaces en même temps que les plus simples. Un effort de vulgarisation peut donc améliorer la responsabilité des exploitants pour conserver la productivité de leur terroir en même temps que les paysages.

Conclusions : les recherches nécessaires et les priorités

Les phénomènes d'érosion sont modestes en milieu forestier mais ils posent des problèmes qui s'aggravent croissant avec le développement des villes et des exploitations agricoles mécanisées. Ces problèmes sont complexes parce que leurs causes diffèrent d'un cas à un autre et les méthodes de lutte en dépendent. Or jusqu'ici on a appliqué pratiquement toujours les méthodes mécaniques qui visent à réduire l'énergie du ruissellement, au lieu d'éviter la dégradation des sols par la battance des pluies, cause la plus générale en zone agricole.

L'érosion est un processus rapide, bien plus rapide que l'altération des roches et la reconstitution des sols. Ce problème est heureusement encore très limité dans l'espace en milieu forestier, mais on peut craindre qu'il s'étende avec l'extension des défrichements et de l'agriculture mécanisée.

La conservation de l'eau et de la fertilité des sols est l'affaire des exploitants. Cependant l'État est partie prenante, en particulier lors des grandes inondations : il doit donc favoriser l'information en milieu paysan et aider les exploitants à orienter correctement leurs aménagements. Dans la plupart des cas, il est plus utile de corriger un mode d'exploitation peu équilibré que de construire à grands frais un réseau de terrasses lequel n'améliore ni la production ni les sols dégradés ; il suffit souvent d'augmenter la couverture du sol et de restituer le maximum de résidus organiques (aménagement des résidus de culture et des jachères herbacées ou prairies temporaires).

Enfin la conservation du sol n'est pas une fin en soi. Comme la fertilisation minérale, la sélection d'espèces performantes et l'irrigation, c'est une technique moderne qui doit permettre l'intensification de l'exploitation agricole sans destruction du patrimoine.

Les mesures d'érosion réalisées sous forêts tropicales sont extrêmement rares. Elles sont pourtant très instructives pour la compréhension de la dynamique actuelle de l'eau et des matières dans le profil pédologique et les versants. Cependant c'est essentiellement sous culture et dans le souci de mettre en œuvre une politique de conservation du sol que les études d'érosion trouvent leur justification.

Les axes qui devraient actuellement orienter les travaux sont les suivants :

1. Enquêtes auprès des autorités locales et des grandes sociétés de plantation pour préciser l'étendue des phénomènes d'érosion et les circonstances de leur apparition ;

2. Analyse des facteurs conditionnant l'érosion au champ à l'aide de simulateurs de pluie de taille diverse comme il en existe en Côte-d'Ivoire ;
3. Démonstration locale et étude comparative en parcelles d'érosion de différents systèmes d'exploitation proposés, de l'influence de la pente et de la résistance du sol à l'agressivité des pluies naturelles durant une longue période (5 ans minimum) ;
4. Analyse complète de systèmes de production en vraie grandeur dans de petits bassins versants de quelques

hectares (faisabilité technique, intérêt économique, conservation de l'eau, des sols et de leur fertilité) ;

5. Comparaison dans les bassins représentatifs ou expérimentaux, de différentes couvertures végétales naturelles ou aménagées par l'homme ;
6. Comparaison de l'efficacité des méthodes biologiques de conservation des sols et des méthodes mécaniques (terrasses) souvent plus coûteuses et qui ne devraient être utilisées qu'en cas d'échec des premiers.

Bibliographie sélective

Bilan hydrique

- *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.
- *AUBREVILLE, A. *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Paris, Soc. Éd. géographiques, maritimes et coloniales, 1949, 351 p.
- BAILLY, C.; BENOÎT 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. In: *Cahiers scientifiques, suppl., Bois et Forêts des Tropiques* (C.T.F.T., Nogent-sur-Marne), n° 4, 1974, 114 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 subéquatoriale de basse Côte-d'Ivoire. *La Terre et la Vie* (Paris), 29, 1975, p. 169-264.
- BLANCANEUX, Ph. *Dynamique de sols ferrallitiques sur granito-gneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique*. Cayenne, ORSTOM, Rapport multigr., 1979, 162 p.
- BRUNET-MORET, Y. *Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale*. Ouagadougou, Haute-Volta ORSTOM, Comité Inter-États d'Études Hydrauliques, 1963, 40 p. multigr.; Abidjan, Côte-d'Ivoire, ORSTOM, Comité Inter-États d'Études Hydrauliques, 1967, 20 p. multigr.
- 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.
- ELDIR, M. Le climat. In: *Le milieu naturel de la Côte-d'Ivoire*, p. 77-108, Paris, ORSTOM, Mémoire n° 50, 1971.
- *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.
- 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.
- MOHR, E. J. C.; VAN BAREN, F. A. *Tropical soils*. London and New York, Interscience, 1954, 498 p.
- *NYE, P. H. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and Soil*, 13, 1961, p. 333-346.
- *OVINGTON, J. D. A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry*, 27, 1954, p. 41-53.
- *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.
- . *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale*. Paris, ORSTOM, Travaux et Documents, 130, 1981, 569 p.
- ; 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.; CHUNGAO, 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.
- THORNTON, 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.
- * WHITMORE, T. C. *Tropical rain forests of the Far East*. Oxford, Clarendon Press, 1975, 278 p., 550 références.
- Pédologie générale et classification des sols*
- 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. *West African soils*. London, Oxford University Press, 1970, 332 p.
- AUBERT, G. Observations sur la formation de la cuirasse latéritique dans le nord-ouest du Dahomey. In : 4^e Congrès Ass. Int. Sci. Sol (Amsterdam), III, 1950, p. 127-128.
- . Les sols latéritiques. In : 5^e Congr. Ass. Int. Sci. Sol (Léopoldville), 1, 1954, p. 103-118.
- * —. Influence des divers types de végétation sur les caractères et l'évolution des sols en régions équatoriales et sub-équatoriales 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* (Paris), *Série Pédologie*, 3, 1961, p. 269-288.
- ; SEGALIN, P. Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, IV, 4, 1966, p. 97-112.
- ; PINTA, M. *Les éléments-traces dans les sols*. Paris, ORSTOM, 1971, 110 p.
- BARTHOLOMEW, W. V. ; MEYER, J. ; LAUDELOUT, H. Mineral nutrient immobilisation under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgium Congo) région. *Publ. INEAC (Bruxelles)*, *série sci.*, n° 57, 1953, 27 p.
- BEAUDOU, A. G. et al. Notes sur la micromorphologie de certains sols ferrallitiques jaunes de régions équatoriales d'Afrique. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, 15, 4, 1977, p. 361-379.
- ; CHATELIN, Y. La pédoplasation dans certains sols ferrallitiques rouges de savane en Afrique centrale. *Cahiers ORSTOM*, Paris, *série Pédologie*, 17, 1, 1979, p. 3-8.
- BECKETT, P. H. T. Potassium-calcium exchange equilibria in soils : specific adsorption sites for potassium. *Soil Science*, 97, 1964, p. 376-383.
- BERGER, J. M. Profils culturaux dans le centre de la Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM*, *série Pédologie*, 1, 1964, p. 41-69.
- BERLIER, Y. ; DABIN, B. ; LENEUF, N. Comparaison physique, chimique et microbiologique entre les sols de forêt et de savane sur les sables tertiaires de la basse Côte-d'Ivoire. In : 6^e Congrès. Int. Sci. Sol (Paris), V, 81, 1956, p. 499-502.
- BLIC, P. de. *Évolution de quelques sols de Côte-d'Ivoire, sous l'effet du défrichement et de la culture mécanisée*. Paris, ORSTOM, 1973, 58 p., multigr.
- BOCQUET, M. ; MICHAUD, P. Choix d'une méthode d'ouverture en forêt pour une plantation de palmier à huile. *Oléagineux*, 16, 1961, p. 149-154.
- BOISSEZON, P. de. Étude du complexe absorbant des sols forestiers de Côte-d'Ivoire. *Cah. ORSTOM* (Paris) *série Pédologie*, Vol. VIII, n° 4, 1970, p. 391-418.
- , et al. *Les sols ferrallitiques*. Tome IV. La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques, Paris. ORSTOM, Init. Doc. Techn., n° 21, 1973, 146 p.
- BONIFAS, M. Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lor.*, n° 17, 1959, 159 p.
- BOULANGE, B. ; DELVIGNE, J. ; ESCHENBRENNER, V. Descriptions morphoscopiques, géochimiques et minéralogiques des faciès cuirassés des principaux niveaux géomorphologiques de Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM* (Paris) *série Géologie*, 2, 2, 1973, p. 59-79.
- BOULVERT, Y. Un type de modelé cuirassé. La série métamorphique de Kouki (R.C.A.). *Cahiers ORSTOM* (Paris) *série Pédologie*, IX, 4, 1971.
- BOURGAT, F. *Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar*. Paris, Mém. ORSTOM, n° 57, 1972, 335 p.
- BOUYER, S. ; DAMOUR, M. Les formes de phosphore dans quelques types de sols tropicaux. In : 8^e Congrès Int. Sci. Sol (Bucarest), IV, 60, 1964, p. 551-561.
- BOYER, J. Soil potassium. In : *Soils of the humid tropics*. Washington, National Academy of Sciences, 1972, p. 102-135.
- . Comportement du potassium dans les sols tropicaux cultivés. 10^e Coll. Inst. Inter. Potasse. (Abidjan, 3-7 déc. 1973), 1973, p. 83-102.
- . L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, vol. XIV, n° 4, 1976.
- . *Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides*. Paris, ORSTOM, Init. Doc. Tech. n° 35, 1978, 173 p.
- BRAMS, E. A. Continuous cultivation of west African soil : organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and Soils* (The Hague), 35, 1971, p. 401-414.
- . Residual soil phosphorus under sustained cropping in the humid tropics. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 37, 4, 1973, p. 579-583.
- CHATELIN, Y. *Les sols ferrallitiques*. Tome 1. *Historique. Développement des connaissances et formation des concepts actuels*. Paris, ORSTOM, Init. Doc. Tech. n° 20, 1972, 98 p.
- . *Les sols ferrallitiques*. Tome 3. *L'altération*. Paris, ORSTOM, Init. Doc. Tech. n° 24, 1974, 143 p.
- CHAUVEL, A. Observation micromorphologique de la partie supérieure des sols rouges ferrallitiques de Casamance (Sénégal). Essai d'interprétation de la dynamique actuelle, sous couvert forestier. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, vol. X, n° 4, 1972, p. 343-357.
- . *Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées*. Paris, ORSTOM, Trav. & Doc. n° 62, 1977, 532 p.
- CLAISSE, G. Étude de l'altération de la charnockite de Man. *Ann. Agron.*, 1, 1953, p. 1-8.
- . Étude sur la solubilisation du quartz en voie d'altération. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, 10, 2, 1972, p. 97-122.
- COLLINET, J. Contribution à l'étude des « stone-lines » dans la région du Moyen-Ogooué. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, 7, 1, 1969, p. 3-44.
- CPCS. *Classification des sols*. ENSA-Grignon, Laboratoire de Pédologie-Géologie, 1967, 87 p.

- CULOT, J. P. ; LAUDELOUT, H. Rétrogradation et utilisation des engrais phosphatés dans les sols du Congo belge. *Pédologie* (Gand), VII, 1957, p. 162-168.
- DABIN, B. Les facteurs de la fertilité des sols des régions tropicales en cultures irriguées. *Bull. Ass. fr. Étude Sol*, n° spécial, 1961.
- . Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte-d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, série Pédologie*, 1, 1964, p. 29-40.
- . Sur une méthode d'analyse de phosphore dans les sols tropicaux. In : *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux* (Tananarive), 1, 1967, p. 99-115.
- . Premiers résultats d'une enquête sur les teneurs en soufre des sols d'Afrique tropicale. *Annales agronomiques* (numéro spécial : Colloque sur le soufre en agriculture, Versailles, France), 1970b.
- . Évolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée. *Phosphore et Agriculture*, 58, 1971, p. 1-14.
- DELVIGNE, J. *Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique*. Paris, Mém. ORSTOM, n° 13, 1965, 177 p.
- FAO and UNESCO. *Approaches to soil classification*. Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 32, 1968, 143 p.
- . *Définitions of soil units*. Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 33, 1968, 72 p.
- . *Supplement to report no. 33*. Rome, FAO, World Soil Resources Report no. 37, 1969, 72 p.
- FAUCK, R. L'évolution du sol sous culture mécanisée. Le problème du pH et sa correction. In : *6^e Congrès Int. Sci. Sol* (Paris), IV, 55, 1956a, p. 379-382. Conservation des sols et mise en valeur agricole en région tropicale. In : *6^e Cong. Ass. Int. Sci. Sol* (Paris), D, 1956, p. 591-595.
- . Évolution des quartz dans les sols rouges ferrallitiques développés sur les roches sableuses et gréseuses de l'Afrique Occidentale. *C. R. Acad. Sci.* (Paris), 271, 1970, p. 2273-2276.
- . *Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale*. Paris, ORSTOM, Mém. n° 67, 1972, 257 p.
- FOLSTER, H. ; MOSHREFI, N. ; OJENUGA, A. G. Ferrallitic pedogenesis on metamorphic rocks, S-W Nigeria. *Pédologie*, 21, 1, 1971, p. 95-124.
- FORSTER, H. L. The identification of potentially K deficient soils in Uganda. *East Afric. Agric. and For. J.*, 37, 3, 1972, p. 224-233.
- FRIPIAT, J. J. ; GASTUCHE, M. C. Étude physico-chimique des surfaces des argiles. Les combinaisons de la kaolinite avec les oxydes du fer trivalent. *Publ. I.N.E.A.C. (Bruxelles), sér. sci.*, n° 54, 1952, 60 p.
- FRIPIAT, J. J. ; HERBILLON, A. J. Formation and transformation of clay minerals in tropical soils. In : UNESCO. *Nat. Res. Res.*, 11, 1971, p. 15-24.
- GASTUCHE, M. C., DELVIGNE, J. ; FRIPIAT, J. J. Altération chimique des kaolinites. *Conf. Intern. Sci. Sol* (Léopoldville), 2, 1954, p. 439-456.
- . FRIPIAT, J. J. ; KIMPÉ, C. de. La genèse des minéraux argileux de la famille du kaolin. 1. Aspect colloïdal. 2. Aspect cristallin. In : *Genèse et synthèse des argiles*, p. 57-80, Paris, Coll. C.N.R.S., n° 105, 1961.
- GODEFROY, J. *Évolution de la matière organique sous culture de bananier et d'ananas*. Thèse Nancy I, AO9296, 1974, 166 p.
- HERBILLON, A. ; GASTUCHE, M. C. Synthèse et genèse de l'hydrargillite. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, 254, 1962, p. 1105-1107.
- HERBILLON, A. J. ; FRANKART, R. ; VIELVOYE, L. Évolution des fractions argileuses dans une toposéquence du Burundi. Comparaison avec les caractères morphologiques des horizons B. *Pédologie*, 16, 2, 1966, p. 167-182.
- HERVIEU, J. ; NALOVIC, L. Dosage des éléments cobalt, nickel, cuivre et zinc, et leur distribution dans quelques types de sols de Madagascar. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, vol. III, n° 3, 1965, p. 237-267.
- HUMBEL, F. X. La compacité des sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, 12, 1, 1974, p. 73-101.
- . *L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun*. Paris, ORSTOM, Trav. & Doc. n° 54, 1976.
- . MULLER, J. P. ; RIEFFEL, J. M. Quantités de matière organique associées aux sols du domaine ferrallitique au Cameroun. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, vol. XV, n° 3, 1977, p. 259-274.
- KAMPRATH, E. J. Soil acidity and liming in : *Soils of the humid tropics*. Washington, Nat. Acad. of Science, 1972, p. 136-149.
- LAUDELOUT, H. Étude sur l'apport d'éléments minéraux résultant de l'incinération d'une jachère forestière. In : *5^e Congrès Assoc. Int. Sci. Sol* (Léopoldville), 1954.
- LE BUANEC, B. Dix années de culture motorisée sur un bassin versant du centre Côte-d'Ivoire. Évolution de la fertilité et de la production. *Agron. Trop.*, vol. 28, n° 11, 1972, p. 1191-1211.
- . et al. 17 ans de culture mécanisée dans le Centre Côte-d'Ivoire. *Agron. Trop.*, XXXVI, 3, 1981, p. 203-211.
- LELONG, F. Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane Française). *Sciences de la Terre*, Mém. n° 14, 1969, 188 p.
- LENEUF, N. *L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte-d'Ivoire forestière, et les sols qui en sont dérivés*. Paris, ORSTOM, Thèse Fac. Sci., 1959, 212 p.
- LEPRUN, C. *Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse. Transformation. Dégénération*, 1979.
- LÉVÊQUE, A. Le problème des sols à nappes de gravats au Togo. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, 7, 1, 1969, p. 43-70.
- . *Pédogenèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels*. Paris, ORSTOM, Trav. et Doc. n° 108, 1979, 224 p.
- MAIGNIEN, R. *Le cuirassement des sols en Guinée*. Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lor. n° 16, 1958, 235 p.
- . *Compte rendu de recherches sur les latérites*. Unesco, Recherches sur les ressources naturelles, 4, 1966, 155 p.
- MARTIN, G. Synthèse agropédologique sur les sols de la Vallée du Niari, in : *Quinze ans de travaux et recherches dans les pays du Niari*, vol. III, 1968, p. 53-145.
- MARTIN, D. Les horizons supérieurs des sols ferrallitiques sous forêt et sous savane du Centre Cameroun. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, 11, 2, 1973, p. 155-180.
- . Les sols des cacaoyères du Woleu-Ntem (Gabon). *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, XV, 3, 1977.
- MOHINDER SINGH, M. *Exchange reactions of potassium, magnesium and aluminium in some Malayan soils*. Univ. of Malaya, Ph. D., Fac. of Sci., 1970, p. 45-151.
- MULLER, J. P. Étude macromorphologique des sols appauvris en argile du Gabon. *Cahiers ORSTOM* (Paris), *série Pédologie*, vol. X, n° 1, 1972, p. 77-93.
- . Microstructuration des structichrons rouges ferrallitiques, à l'amont des modelés convexes (Centre Cameroun).

- Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, 15, 3, 1977, p. 239-258.
- . La microlyse plasmique et la différenciation des épipédons dans les sols ferrallitiques rouges du Centre-Cameroun. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, 15, 4, 1977, p. 345-359.
- . La séquence verticale d'organisation des horizons meubles des sols ferrallitiques camerounais. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, 16, 1, 1978, p. 73-82.
- . Séquence of vertical evolution of the microorganization of loose ferrallitic materials in the Cameroon. In : 6^e Intern. Meeting on Soil Micromorphology, Londres, 1981.
- ; BOCQUIER, G. ; NAHON, D. ; PAQUET, H. Analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, XVIII, 2, 1980-1981, p. 87-110.
- NALOVIC, L. Étude spectrographique des éléments traces et leur distribution dans quelques types de sols de Madagascar. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. 7, n° 2, 1969, p. 133-181.
- ; PINTA, M. Recherches sur les éléments tracés dans les sols tropicaux : étude de quelques sols du Cameroun. *Géoderma (Amsterdam)*, vol. 7, n° 3-4, 1972, p. 249-267.
- OLIVER, R. ; DAMOUR, M. ; VELLY, J. ; RAZAFINDRAMONJY, J. B. Étude de la relation pH, carence en base sur trois sols hydromorphes des hautes terres malgaches. *Agron. Trop.*, vol. 29, n° 1, 1974, p. 28-42.
- OLLAGNIER, M. ; LAUZERAL, A. ; OLIVIN, J. ; OCHS, R. Évolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt. *Oléagineux*, 33, 11, 1978, p. 537-544.
- PÉCROT, A. ; GASTUCHE, M. C. ; VIELVOYE, L. ; FRIPIAT, J. J. L'altération des roches et la formation des sols au Kivu. *Publ. I.N.E.A.C. (Bruxelles), sér. Sci.*, n° 97, 1962, 90 p.
- PEDRO, G. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. *Ann. Agron.*, 2, 3, 4, 1964, p. 85-456.
- PERNET, R. Évolution des sols de Madagascar sous l'influence de la végétation. *Mém. Inst. Rech. Scient. Madagascar*, D, 6, 1954, p. 201-419.
- PERRAUD, A. Note sur différents types d'humus de sols ferrallitiques forestiers de la Côte-d'Ivoire. *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, 272, 1970, p. 1594-1597.
- . *La matière organique des sols forestiers de la Côte-d'Ivoire*. Nancy, Thèse Fac. Sci., 1971, 82 p.
- PICHOT, J. ; ROCHE, P. Phosphore dans les sols tropicaux. *Agron. Trop.*, vol. 27, n° 9, 1972, p. 939-965.
- PIERI, C. Premiers résultats expérimentaux sur la sensibilité de l'arachide à la toxicité aluminique. *Agron. Trop.*, 29, 6-7, 1974, p. 685-695.
- RIQUIER, J. Contribution à l'étude des « stone-lines » en régions tropicale et équatoriale. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, 7, 1, 1969, p. 71-110.
- ROCHE, P. Contribution à l'étude du statut phosphorique des sols de Madagascar. Influence sur les problèmes de fertilité. *Agron. Trop.*, vol. 22, n° 3, 1967, p. 249-308.
- ROOSE, E. Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte-d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Abidjan, Thèse Doct.-Ing. Fac. Sci., ORSTOM Abidjan, n° 20, 1973, 125 p. multigr.
- . *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en petites parcelles expérimentales*. Paris, ORSTOM, Travaux et Documents, n° 78, 1977, 108 p.
- . *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Paris, ORSTOM. Trav. et Doc. n° 130, 1981, 569 p.
- SARAZIN, G. ; ILDEFONSE, P. ; MULLER. Contrôle de la solubilité du fer et de l'aluminium en milieu ferrallitique. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 1982, (sous presse).
- SIBAND, P. Étude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance. *Agron. Trop.*, 27, 5, 1972, p. 574-591.
- SIEFFERMANN, G. *Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun*. Paris, ORSTOM, Mém. n° 66, 1973, 183 p.
- SEGALEN, P. Étude de sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Mém. Inst. Sci. Madagascar*, D, 8, 1957 ; p. 1-195.
- . *Le fer dans les sols*. Paris, ORSTOM, Sér. Init. Doc. Techn. n° 4, 1964, 150 p.
- . Méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, VI, 1, 1968.
- . Le remaniement des sols et la mise en place de la « stone-line » en Afrique. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, 7, 1, 1969, p. 113-127.
- . Contribution à la connaissance de la couleur des sols à hydroxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, 7, 2, 1969, p. 225-236.
- . *L'aluminium dans les sols*. Paris, ORSTOM, Init. Doc. Tech. n° 21, 1973, 283 p.
- SUMNER, M. E. Effect of iron oxides on positive and negative charges in clays and soils. *Clay. Min. Bull.*, 5, 29, 1963, p. 218-226.
- ; MARQUES, J. M. Ionic equilibria in a ferrallitic clay : specific adsorption sites for K. *Soil Sci.*, 102, 1966, p. 187-192.
- TARDY, Y. *Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Strasbourg, Thèse Fac. Sci., 1969, 274 p., multigr.
- TRINH SAMBATH. *Les différentes formes des constituants aluminiques dans les sols acides des pays d'Afrique*. Univ. Paris VI, Thèse Doc. 3^e cycle, 1976, 85 p.
- TRINH, S. Rôle tampon des constituants aluminiques dans les sols acides de quelques pays d'Afrique et de Madagascar. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, vol. XIV, n° 81, 1976.
- . Essais d'élimination de l'aluminium échangeable par application d'engrais (PO, H₂K, KNO, CaO). *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, vol. XV, n° 2, 1977.
- USDA, Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy*. Agriculture Handbook, n° 436, 1975, 754 p.
- VALENTIN, C. *Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte-d'Ivoire*. Abidjan, ORSTOM, 1978, 150 p. multigr. + Annexes.
- VELLY, J. Observations sur l'acidification de quelques sols à Madagascar. *Agron. Trop.*, 29, 12, 1974, p. 1249-1262.
- VOGT, J. ; VINCENT, P. L. Terrains d'altération et de recouvrement en zone intertropicale. *Bull. Bur. Rech. Géol. Min.*, 4, 1966, p. 3-111.

Facteurs physiques de la fertilité

- 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.
- BEAUDOU, A. E. ; BLIC, Ph. de. Étude typologique du complexe sol-plante en cultures intensives semi-mécanisées dans le

- centre ivoirien. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série pédologie, 16, 4, 1978, p. 375-398.
- BERGER, J. M. Profils culturaux dans le centre de la Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, 1, 1964, p. 41-69.
- BERTRAND, F. Étude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé (Côte-d'Ivoire). In : *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux* (Tananarive), 2, 1967, p. 1281-1295.
- BLIC, P. de. *Évolution de quelques sols de Côte-d'Ivoire, sous l'effet du défrichement et de la culture mécanisée*. Paris, ORSTOM, 1973, 58 p. multigr.
- BOIS, J. F. ; ROOSE, E. Quelques réflexions sur les résultats de mesures systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol forestier de basse Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, 15, 4, 1978, p. 351-363.
- BOYER, J. ; COMBEAU, A. Étude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de la République Centrafricaine. *Sols Africains*, vol. V, n° 1, 1960, p. 6-42.
- CASABIANCA, F. de. Facteurs physiques de fertilité des sols dans le Sud-Ouest malgache. In : *Colloque Fertilité des sols tropicaux* (Tananarive), II, 1967, p. 1540-1546.
- CATHERINET, M. Note sur la culture du macabo et du taro au Cameroun. *Agron. Trop.*, 10, 1965, p. 717.
- COLLINET, J. ; VALENTIN, C. Un schéma des interrelations hydrodynamiques dans les milieux naturels et cultivés. Valorisation des données morphologiques. In : *Informatique et Biosphère* (Actes Coll. Abidjan), 1979, p. 155-177.
- ; —. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, vol. XVII, n° 4, 1979.
- COMBEAU, A. ; MONNIER, G. Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux. *Sols africains*, vol. VI, n° 1, 1961.
- ; QUANTIN, F. Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, 3, 1963, p. 17-26.
- CULOT, J. P. ; VAN WAMBEKE, A. Contribution à l'étude des déficiences minérales du caféier Arabica au Kivu. *Publ. INEAC (Bruxelles)*, série scient. n° 73, 1958, 105 p.
- DABIN, B. Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, 1, 1964, p. 29-40.
- . Facteurs physiques de la fertilité. In : *Techniques rurales en Afrique* (ORSTOM-BDPA), 1970, 278 p.
- DUGAIN, F. Étude sur la fertilité des sols de la plaine bananière du Cameroun. In : *Fruits*, 15, 1960, p. 153.
- GODEFROY, J. Le développement des racines du bananier dans divers sols. In : *Fruits*, 24, 1969, p. 101-104.
- HÉNIN, S. ; GRAS, R. ; MONNIER, G. *Le profil cultural*. 2^e édition. Paris, Masson, 1969, 332 p.
- HUMBEL, F. X. La compacité des sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, 12, 1, 1974, p. 73-101.
- . *L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun*. Paris (ORSTOM), Trav. & Doc. n° 54, 1976.
- HUTTEL, Ch. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte-d'Ivoire, IV. Estimation du bilan hydrique. *Rev. Ecol. Appl.*, 29, 1975, p. 192-202.
- LAFFORGUE, A. ; NAAH, E. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Hydrologie, XIII, 3, 1976, p. 195-237.
- LAL, R. *Role of mulching techniques in tropical soil and water management*. Ibadan, I.I.T.A., Technical Bull. no. 1, 1975, 38 p.
- . *Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control*. Ibadan, I.I.T.A., Monograph, 1976, 126 p.
- LATHAM, M. Rôle du facteur sol dans le développement du cotonnier en Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, IX, 1, 1971.
- LE BUANEC, B. Dix années de culture motorisée sur un bassin versant du centre Côte-d'Ivoire. Évolution de la fertilité et de la production. *Agron. Trop.*, vol. 28, 11, 1972, p. 1191-1211.
- et al. 17 ans de culture mécanisée dans le Centre Côte-d'Ivoire. Évolution de la fertilité et de la production. *Agron. Trop.*, 36, 13, 1981, p. 203-211.
- MARTIN, G. Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la Vallée du Niari. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, 2, 1963, p. 8-14.
- . Synthèse agropédologique sur les sols de la Vallée du Niari. In : *Quinze ans de travaux et recherches dans les pays du Niari*, vol. 3, p. 53.
- MOREAU, R. Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique de Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, XVI, 1978, p. 413-424.
- MOREL, R. ; QUANTIN, P. Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (R.C.A.) *Agron. Trop.*, 27, 6-7, 1972, p. 667-739.
- NGO CHAN BANG. Proposition de nouveaux indices pour caractériser la structure d'un sol. Applications à quelques cas agronomiques. *Agron. Trop.*, vol. 33, n° 12, 1968, p. 1309-1327.
- OCHS, R. ; OLIVIN, J. Réserve en eau d'une palmeraie adulte. *Oléagineux*, 20, 4, 1965, p. 231-235.
- POSS, R. La dynamique de l'eau saturante dans les sols de la périphérie d'un Inselberg en milieu ferrallitique de transition (nord Côte-d'Ivoire). Typologie des sols et tests hydrodynamiques. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série Pédologie, vol. XVI, n° 2, 1978.
- RICHARD, L. Évolution de la fertilité en culture intensive. *Coton et Fibres tropicales*, 22, 3, 1967, p. 357-391.
- ROOSE, E. *Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique de basse Côte-d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical*. Abidjan, Thèse ing. Doc. Fac. Sci., 1973, 124 p. multigr.
- . *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale*. Paris, ORSTOM, Trav. et Doc. n° 130, 1981, 569 p.
- . Dynamique actuelle comparée de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux. Conséquences pratiques pour la mise en valeur en régions tropicales humides et sèches. In : *XII Congrès Ass. Intern. Sci. Sol* (New Delhi), 1982, 9 p.
- TALINEAU, J. C. ; ROOSE, E. *Réserve hydrique du sol et comparaison de son utilisation par une graminée et une légumineuse fourragère tropicale*. Coll. IAEA/FAO, 176/26, Vienne, sept. 1973. Abidjan, ORSTOM, 1973, 19 p. multigr.
- VALENTIN, C. *Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte-d'Ivoire*. Abidjan, ORSTOM, 1978, 150 p. multigr.

Facteurs chimiques de la fertilité

- BIROT, Y. Effet de la carence en bore sur eucalyptus. In : *Colloque Fertil. Sols Tropicaux*, tome I, 1967, p. 1019-1023.

- BLONDEL, D. Induction d'une chlorose ferrique en sol sableux par des eaux d'irrigation calco-magnésiennes. *Agron. Trop.*, 25, 6-7, 1970, p. 555-560.
- BRAUD, M. Le soufre dans la fertilisation minérale du cotonnier. *Coton et Fibres tropicales*, 17, 3, 1964, p. 357-362.
- . La fertilisation minérale du cotonnier en Afrique et à Madagascar. *Coton et Fibres tropicales*, 22, 2, 1967, p. 247-274.
- ; MEGIE, C. ; FRITZ, A. ; QUILLON, P. J. Sur la déficience en bore du cotonnier. *Coton et Fibres tropicales*, 24, 4, 1969, p. 465-467.
- BONNIER, C. Symbiose Rhizobium-Légumineuse en région équatoriale. *Publ. INEAC (Bruxelles), sér. scient.*, n° 72, 1957, 67 p.
- BOUCHY, C. Contribution à l'étude des déficiences minérales du sol en culture cotonnière de Côte-d'Ivoire. *Coton et Fibres tropicales*, 25, 2, 1970, p. 235-251.
- . Essai de fertilisation organo-minérale : 10 années de culture intensive maïs-cotonnier en Côte-d'Ivoire. *Coton et Fibres tropicales*, 28, 3, 1973, p. 343-364.
- BOUYER, S. L'interaction azote/phosphore dans les recherches sur la fertilité des sols tropicaux. In : *Colloque Fertil. Sols trop.*, tome I, 1967, p. 397-410.
- ; DAMOUR, M. Les formes du phosphore dans quelques types de sols tropicaux. In : *Transactions 8th Int. Cong. Soil Sci.*, 4, 1964, p. 551-561.
- BOYER, J. Essai des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone. In : *Committee on tropical soils, National Academy of Sciences (Washington)*, 1970, 175 p. multigr.
- . Soil potassium. In : *Soils of the humid tropics* (National Academy of Sciences Washington), 1972, p. 102-135.
- . Comportement du potassium dans les sols tropicaux cultivés. *10^e Coll. Inst. Inter. Potasse* (Abidjan, 3-7 déc. 1973), p. 83-102.
- . L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cahiers ORSTOM (Paris), série Pédologie*, vol. XIV, n° 4, 1976.
- CELTON, J. ; ROCHE, L. ; VELLY, J. Acidité du sol et chaulage. *Agron. Trop.*, vol. 28, n° 2, 1973, p. 123-130.
- CHAMINADE, R. L'élévation du niveau de fertilité des sols tropicaux, conditions de l'établissement de systèmes de culture intensive. In : *Colloque d'Abidjan*, II, 1968, p. 18-24.
- CHARPENTIER, J. M. ; MARTIN-PREVEL, P. Carences atténuées ou temporaires en éléments majeurs. Carences en oligo-éléments sur bananiers. *Fruits*, 20, 1965, p. 521.
- 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.
- CULOT, J. P. ; LAUDELOUT, H. Rétrogradation et utilisation des engrais phosphatés dans les sols du Congo Belge. *Pédologie*, VII, 1957, p. 162-168.
- ; VAN WAMBEKE, A. Contribution à l'étude des déficiences minérales du caféier Arabica au Kivu. *Publ. INEAC (Bruxelles) sér. scient.* n° 73, 1958, 105 p.
- DABIN, B. Étude des formes du phosphore dans quelques sols des Antilles. *Cah. ORSTOM (Paris), série Pédologie*, II, 1, 1964.
- . Sur une méthode d'analyse de phosphore dans les sols tropicaux. In : *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux* (Tananarive), 1, 1967, p. 99-115.
- . Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. *Coton et Fibres tropicales*, 25, 1970, p. 213-234.
- . Premiers résultats d'une enquête sur les teneurs en soufre des sols d'Afrique tropicale. *Annales agronomiques* (numéro spécial : Colloque sur le soufre en agriculture, Versailles, France), 1970.
- . Évolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée. *Phosphore et Agriculture*, 58, 1971, p. 1-14.
- DANIEL, C. ; MANCIOT, R. La nutrition en chlore des jeunes cocotiers aux Nouvelles-Hébrides. *Oléagineux*, 28, 2, 1973, p. 71-72.
- DEUSS, J. Rentabilité de la fumure du caféier Robusta à Boukoko (R.C.A.). *Café, Cacao, Thé*, 12, 1, 1967, p. 28-38.
- DOMMERGUES, Y. Minéralisation de l'azote aux faibles humidités. In : *7th Int. Congress of Soil Sci.* (Madison, Wisconsin, USA), III, 1960, p. 672-678.
- . Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et tropicale sèche. Paris, Thèse, n° 4739, 1962, 160 p.
- . Nouvelles possibilités d'amélioration de la fertilité des sols par des méthodes biologiques. In : *Colloque Fertil. des sols tropicaux*, tome I, 1967, p. 1627-1636.
- ENWEZOR, W. O. ; MOORE, A. W. Phosphorus status of some Nigerian soils. *Soil Sci.*, 102, 1966, p. 322-328.
- FAUCK, R. L'évolution du sol sous culture mécanisée. Le problème du pH et sa correction. In : *6^e Congrès Int. Sci. Sol* (Paris), IV, 55, 1956a, p. 379-382. Conservation des sols et mise en valeur agricole en région tropicale. In : *6^e Congrès Ass. Int. Sci. Sol* (Paris), D, 1956, p. 591-595.
- ; MOUREAUX, Cl. ; THOMANN, Ch. Bilan de l'évolution des sols de Sefa (Casamance) après 15 ans de culture continue. Dakar, ORSTOM, 1964, rapport multigr.
- FORESTIER, J. Étude sur le phosphore dans les sols latéritiques. *Agron. Trop.*, 15, 5, 1960, p. 543-567.
- . Relations entre l'alimentation du caféier Robusta et les caractéristiques analytiques du sol. *Café, Cacao, Thé*, 8, 2, 1964, p. 89-112.
- ; BELEY, J. Teneur en soufre et en oligo-éléments des feuilles du caféier Robusta en Lobaye (R.C.A.), *Café, Cacao, Thé*, 10, 1, 1966, p. 17-27.
- FRANKART, R. ; GROEGAERT, J. Contribution à l'étude de la nutrition minérale du caféier Robusta en Uelé. *Publ. INEAC (Bruxelles), sér. scient.* n° 80, 1959, 107 p.
- FRANQUIN, P. L'estimation du manganèse du sol en rapport avec le phénomène de toxicité. *Coton et Fibres tropicales*, 13, 3, 1958, p. 393-408.
- FRÉMONT, Y. ; NUCÉ DE LAMOTHE, M. Nutrition minérale du cocotier. *Oléagineux*, 23, 2, 1968, p. 93-97.
- GODEFROY, J. ; LECOCO, J. ; LOSOIS, P. Évolution des caractéristiques chimiques et structurales d'un sol volcanique sous bananiers. *Fruits*, 24, 1969, p. 257-271.
- HESSE, P. R. Sulphur and nitrogen changes in forest soils of East Africa. *Plant and Soil* (The Hague), 9, 1957, p. 86-96.
- JACQUEMIN, H. ; BERLIER, Y. Évolution du pouvoir nitrifiant d'un sol de basse Côte-d'Ivoire sous l'action du climat et de la végétation. In : *6^e Congrès Int. Sci. Sol* (Paris), III, 58, 1956, p. 343-347.
- LE MARE, P. H. Soil fertility studies in three areas of Tanganyika. *Emp. J. Exp. Agr.*, 27, 1959, p. 197-222.
- LOUÉ, A. La nutrition minérale du caféier en Côte-d'Ivoire, Bingerville, C.R.A., 1957, 207 p.
- MARTIN, G. Appréciation des pertes en calcium et magnésium après un apport d'amendements calcaires (Vallée du Niari). Brazzaville, ORSTOM, 1964, rapport multigr.
- MARTIN-PREVEL, P. Un essai « variantes systématiques » sur bananier. *Fruits*, 24, 1969, p. 193-215.

- MOITY, M. La carence en cuivre des tourbières du Nicky, Côte-d'Ivoire, *Fruits*, vol. 16, n° 8, 1961, p. 399-401.
- MOREAU, R. Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique de Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série *Pédologie*, XVI, 4, 1979, p. 413-424.
- MOSS, R. P. *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. ; BERTHEUX, M. H. The distribution of phosphorous in forest and savannah soils of the Gold Coast and its agricultural significance. *J. Agri. Sci.*, 49, 1957, p. 141-159.
- OLLAGNIER, M. ; OCHS, R. Les déficiences en soufre du palmier à huile et du cocotier. *Oléagineux*, 27, 4, 1972, p. 193-198.
- ; —. Interaction entre l'azote et le potassium dans les oléagineux tropicaux. *Oléagineux*, 28, 11, 1973, 493-508.
- ; VALVERDE, G. Contribution à l'étude de la carence en bore du palmier à huile. *Oléagineux*, 23, 6, 1968, p. 359-366.
- PICHOT, J. ; ROCHE, P. Phosphore dans les sols tropicaux. *Agron. Trop.*, vol. 27, n° 9, 1972, p. 939-965.
- ; BURDIN, S. ; TRUONG BINH. Évolution du phosphore dans un sol ferrallitique soumis à différents traitements agronomiques. *Agron. Trop.*, 28, 2, 1973, p. 131-146.
- ; LE BUANEC, B. ; TRUONG BINH ; N'GIEITTA, A. Phosphore et nutrition du maïs en sol ferrallitique. *Agron. Trop.*, 33, 1, 1978, p. 40-50.
- PREVOT, P. ; OLLAGNIER, M. ; AUBERT, G. ; BRUGIÈRE, J. M. Dégradation du sol et toxicité manganique. *Oléagineux*, vol. 10, n° 4, 1955, p. 239-243.
- PY, C. Recherches des meilleures époques d'application de l'engrais en cultures d'ananas. *Fruits*, 18, 1963, p. 75.
- ROCHE, P. ; VELY, J. Étude de l'évolution des éléments fertilisants apportés sur les principaux types de sols du lac Alaotra. *Agron. Trop.*, 17, 1962, p. 841.
- . Contribution à l'étude du statut phosphorique des sols de Madagascar. Influence sur les problèmes de fertilité. *Agron. Trop.*, vol. 22, n° 3, 1967, p. 249-308.
- ; CELTON, J. ; VELY, J. Fertilisation de redressement et entretien de la fertilité. *Agron. Trop.*, 26, 10, 1971, p. 1066-1089.
- et al. Le phosphore dans les sols intertropicaux : appréciation des niveaux de carence et des besoins en phosphore. *Institut mondial du Phosphate*, n° 2, 1980, 48 p.
- TINKER, P. B. Studies on soil potassium III. Cation activity ratios in acid Nigerian soils. IV. Equilibrium cation activity ratios and responses to potassium fertilizer in Nigerian soil palms. *J. Soil Sci.*, 15, 1, 1964, p. 24-41.
- TRUONG, B. ; PICHOT, J. ; BURDIN, S. Étude des effets résiduels du phosphore dans deux sols ferrallitiques par diverses méthodes analytiques (chimiques et isotopiques). *Agron. Trop.*, vol. 28, n° 2, 1973, p. 147-155.
- Érosion*
- 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.
- BAILLY, C. ; DE VERGNETTE, J. ; BENOIT DE COIGNAC, G. ; VELY, 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. Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentation en bassins versants élémentaires. *Cahiers Scientifiques, Suppl. Bois et Forêts des Tropiques* (Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne), n° 4, 1974, 114 p.
- BENNET, H. H. *Elements of soil conservation*. 2nd ed. New York, Mac Graw-Hill, 1939, 993 p.
- CHARREAU, C. ; NICOU, R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.*, 26, 9, 1971, p. 903-978 et 26, 11, 1971, p. 1183-1247.
- COLLINET, J. ; VALENTIN, C. *Analyse de différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques*. Adiopodoumé, ORSTOM, 1979, 2 vol., 80 p. multigr.
- DABIN, B. ; LENEUF, N. *Étude de l'érosion et du ruissellement en Côte-d'Ivoire (1956-1958)*. Adiopodoumé, ORSTOM, 1958, 20 p. multigr.
- DE BLIC, Ph. Le comportement de sols ferrallitiques de Côte-d'Ivoire après défrichement et mise en culture mécanisée. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série *Pédologie*, 14, 2, 1976, p. 113-130.
- ELLISON, W. D. Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. *Trans. Am. Geophys. Union*, 26, 1945, p. 415-429.
- 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.
- GONGGRUP, L. Heterosie-onderzoek. *Tectona* (Buitenzorg, Java), no. 34, 1941, p. 200-220.
- GOIJON, P. ; BAILLY, C. ; DE VERGNETTE, J. ; BENOIT DE COIGNAC, G. ; ROCHE, P. ; VELY, J. ; CELTON, J. Conservation des sols en Afrique et à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 118, 119, 120, 121, 1962.
- HUDSON, N. W. *Soil Conservation*. London, B. T. Batsford Ltd., 1973, 320 p.
- KALMAN, R. *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin de Sebou (Maroc)*. Rabat, Projet Sebou, FAO, 1967, 32 p. multigr.
- LAL, R. *Soil management systems and erosion control*. Ibadan, IITA, 1975, 7 p. multigr.
- . *Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control*. Ibadan, IITA, Monograph 1, 1976, 126 p.
- LAURANT, M. ; BOLLIN, A. Caractérisation des pluies en Belgique du point de vue de leur intensité et de leur érosivité. *Pédologie*, 28, 1978, p. 214-232.
- MASSON, J. H. *L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen, méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ*. Montpellier, Univ. Languedoc, Thèse Doct. Ing., 1971, 213 p.
- MOREAU, R. Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique dans le centre de la Côte-d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM (Paris)*, série *Pédologie*, 16, 4, 1978, p. 413-424.
- OLIVIN, J. et al. Évolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt. Paris, *Oléagineux*, 33, 11, 1978, p. 537-544.
- ROOSE, E. *Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de*

- basse Côte-d'Ivoire. Contribution à l'érosion hydrique en milieu intertropical.* Abidjan, Faculté des Sciences, Thèse Ing. Doct., n° 20, 1973, 125 p.
- . Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. In : *Soil Sc. Soc. America, special publication 21*, 1976, p. 60-74.
- . *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale.* Paris, ORSTOM, Travaux et Documents, 130, 1981, 569 p.
- ROUGERIE, G. *Le façonnement actuel des modelés en Côte-d'Ivoire forestière.* Abidjan, Mémoire IFAN, 58, 1960, 542 p.
- 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.