

# **LES PRODUITS ALUMINEUX DANS LES SOLS DE LA ZONE TROPICALE HUMIDE.**

## **Deuxième partie**

### **LES SOLS DE LA ZONE INTERTROPICALE HUMIDE ET LA GENÈSE DES PRODUITS ALUMINEUX \***

**par**

**P. SEGALEN\*\***

- 1 - La zone intertropicale
  - 1.1 - Données générales sur la zone intertropicale
  - 1.2 - La zone tropicale humide
    - 1.2.1 - Généralités
    - 1.2.2 - Les climats
    - 1.2.3 - La végétation
    - 1.2.4 - Les roches-mères
    - 1.2.5 - La géomorphologie
    - 1.2.6 - Hydrologie
- 2 - La pédogenèse dans la zone intertropicale humide
  - 2.1 - Les sols de la zone chaude et humide en permanence
  - 2.2 - Les sols de la zone à saisons alternantes
  - 2.3 - Les sols à la limite de la zone tropicale humide
- 3 - Essai de généralisation
- 4 - Conclusions

---

\* La première partie a paru dans les Cahiers O.R.S.T.O.M. de Pédologie, 1965, III, 2, p. 149-176.

\*\* La plupart des données présentées dans cette partie peuvent être trouvées dans la littérature. De nombreux renseignements ont été puisés dans les rapports des pédologues de l'O.R.S.T.O.M. et appartiennent aux archives de cet Office. Un grand nombre de données résultent également de l'expérience que l'auteur a pu acquérir au cours de séjours à Madagascar, au Cameroun, et grâce à des voyages effectués en divers pays d'Afrique ou d'Amérique.

# 1 - La zone intertropicale

## 1.1 - DONNÉES GÉNÉRALES SUR LA ZONE INTERTROPICALE

La zone intertropicale est géographiquement définie comme étant située entre les parallèles 23°27' N et S qui correspondent aux limites de culmination au zénith du soleil dans les deux hémisphères. C'est dans cette zone que les rayons du soleil sont les plus voisins de la normale, que la longueur du jour et celle de la nuit sont les plus proches, bref que la quantité de chaleur reçue au sol est la plus élevée. Elle est donc caractérisée avant tout par une chaleur plus forte qu'ailleurs.

Le **climat** est toujours chaud et l'ensemble de la zone jouit d'une température moyenne annuelle comprise entre 23 et 28°. Les amplitudes diurnes et annuelles faibles à l'équateur deviennent de plus en plus fortes au fur et à mesure que l'on se rapproche des tropiques. Seule, l'altitude provoque une diminution sensible de la température moyenne. A l'intérieur de la zone, les distinctions seront fondées essentiellement sur la pluviométrie et le mode de répartition de celle-ci. L'alternance saisonnière se produit, sauf, sur les limites nord et sud, avec une très grande régularité. Mais les climats, tels qu'on les observe actuellement, n'ont pas été toujours semblables à eux-mêmes. MORTELMANS (1950) au Congo, LE BOURDIEC (1958) en Côte d'Ivoire, par exemple, distinguent depuis le tertiaire jusqu'à nos jours une succession de nombreuses phases humides et sèches. Ces variations climatiques ne sont pas sans influencer les sols ; mais un climat pluvieux laissera davantage de traces que les climats secs précédents et un climat plus sec marque difficilement son empreinte sur un sol hérité d'un climat humide. Mais c'est peut-être dans la géomorphologie que les influences des climats du passé seront les plus faciles à lire.

La **végétation naturelle** est essentiellement constituée par des peuplements ligneux dont les caractéristiques dépendent étroitement du climat : forêt dense ombrophile, dans les zones à longue saison des pluies, forêt semi-décidue lorsque la saison sèche s'accuse, décidue ensuite. Sur les limites extérieures de la zone, on passe graduellement, à mesure que la pluviométrie se fait plus rare, à des peuplements spéciaux où les végétaux aphyllés ou succulents, ou épineux, abondent. Dans les déserts ne subsistent que quelques rares végétaux prompts à utiliser une eau parcimonieusement distribuée. La présence de l'homme se traduit par le remplacement des formations précitées par des peuplements secondaires comme la savane ou la steppe (TROCHAIN, 1957).

A priori, il n'y a pas de raison pour qu'un type de **roche-mère** domine dans la zone intertropicale. En fait, il n'en est rien. Les roches d'origine marine telles que marnes ou calcaires sont prépondérantes dans les zones intéressées par les orogénèses récentes (Amérique ou Asie) ainsi que sur les bordures continentales (Afrique du Sud-Est, Côte ouest de Madagascar, bordure de l'Ouest africain, etc.). Par contre, sur l'ensemble des aires continentales, les roches plutoniques et métamorphiques dominent, ainsi que les sédiments continentaux (grès, sables) qui résultent de l'érosion des reliefs. Les roches volcaniques peuvent occuper des superficies étendues à la fois dans les orogènes et sur les aires continentales. Elles constituent (avec le calcaire parfois), l'essentiel des archipels du Pacifique et des Antilles.

Pas plus que les roches-mères, les types de **relief** ne sont distribués de manière quelconque. D'HOORE (1958) a bien montré que les zones plissées de forte altitude se trouvent partout disposées à l'extérieur des masses continentales où l'on peut distinguer une alternance de plateaux et de dépressions. Mais la caractéristique essentielle des masses continentales est avant tout l'extraordinaire extension des zones planes et non plissées, déjà notée par GIGNOUX (1943). Elles résultent du développement des **surfaces d'érosion** étudiées par de nombreux géomorphologues (DRESCH, 1947, 1956, TRICART, 1962, CAHEN et LEPERSONNE 1948, DIXEY 1955, MICHEL 1959, etc.) La similitude de ces surfaces à travers les continents est tellement frappante que KING (1950, 1962) a pu présenter une théorie leur assignant une histoire commune. L'ensemble des masses continentales est, en Afrique par exemple, émergée depuis l'orogénèse hercynienne et, à l'exception de la transgression mi-crétacée, son histoire est étroitement liée à l'action de l'érosion et de la pédogenèse, sans négliger pour autant les mouvements épigénétiques, le compartimentage par failles, l'accumulation volcanique, les actions éoliennes, qui ont affecté de façon importante le relief du continent.

Le résultat de cet ensemble de facteurs sur la pédogenèse dans la zone intertropicale est

que les sols ont évolué sous des climats toujours chauds mais diversement humides, sous une végétation forestière, à partir de roches-mères variées, mais à dominance plutonico-métamorphique. Ils ont disposé de millions d'années pour se développer (BARBIER, 1960; LENEUF, 1959) (1) sur des zones en grande majorité planes, à altitude modeste. Mais les conclusions que l'on peut tirer pour ces sols ne sont pas les mêmes que pour ceux développés dans des montagnes aux pentes plus fortes, sur des roches à caractère basique prononcé, sous climat plus frais et d'âge beaucoup moins ancien.

## 1.2 - LA ZONE TROPICALE HUMIDE

**1.2.1** - La zone intertropicale est caractérisée essentiellement par un climat toujours chaud, mais diversement humide. Toutefois, si on conçoit bien un climat très humide ou très sec, les opinions divergent sensiblement lorsqu'il s'agit de placer une limite entre les deux.

On peut faire intervenir des critères d'ordre physiologique ou anthropique et dire que l'aridité commence lorsqu'on ne peut assurer une culture vivrière sans apport régulier ou artificiel d'eau. On peut calquer les subdivisions climatiques (dont les données font parfois défaut) sur celles de la végétation. Mais, en fait, la végétation dépend étroitement du climat et les modifications apportées à la végétation peuvent résulter d'interventions humaines. On est donc ramené aux données de la météorologie (pluie, température, évaporation, drainage) que l'on utilise telles quelles ou bien en les combinant dans des indices comme ceux de DE MARTONNE (1937, 1942), GAUSSEN (1952), MANGENOT (1951), EMBERGER (1932), HENIN-AUBERT (1945), TURC (1958), etc..

En fait, les climats de la zone intertropicale se traduisent par des différences considérables dans l'altération des minéraux des roches, d'abord, et la constitution des différents horizons du sol ensuite. Des climats diversement chauds et pluvieux résulte l'apparition dans les sols de minéraux assez spécifiques (silicates d'alumine, hydroxydes et oxydes), associés à des propriétés particulières des sols dans le domaine de la morphologie, de la physique et de la chimie. Un certain nombre de ces constituants et de ces propriétés disparaissent et sont remplacés par d'autres lorsque le climat devient plus sec. L'on essaiera de préciser ces données dans les paragraphes ultérieurs, mais, dès maintenant, l'on peut tenter une première définition des caractéristiques de la zone intertropicale humide.

### 1.2.2 - Les climats de la zone intertropicale humide

De nombreuses subdivisions ont été présentées pour distinguer les climats de cette zone (AUBREVILLE, 1949, PEGUY, 1961, etc..). Elles reposent sur la température et la pluie et sa répartition.

**Climats humides et chauds.** Ils sont caractérisés par une température moyenne et une pluviométrie élevées. La répartition de la pluie amène à distinguer deux régimes climatiques : équatorial et tropical.

**Le régime équatorial** est caractérisé par une pluviométrie abondante (2 à 6 m) et bien répartie ; la saison sèche est inexistante ou très courte (moins de deux mois consécutifs). La température est très stable (24 à 26°). On peut distinguer différentes variétés :

- **Le climat équatorial à une seule saison** où la pluviométrie est très forte toute l'année (jusqu'à 6 m). S'il y a une diminution sensible pendant une courte période, celle-ci ne peut être toutefois considérée comme une saison sèche. Ce type de climat intéresse des zones comme le fond du golfe de Guinée (Douala et ses environs), la côte est de Madagascar, diverses îles d'Indonésie, etc..

- **Le climat équatorial à quatre saisons** est caractérisé par une pluviométrie moins forte (1,5 à 2,5 m) et tombant en deux saisons. Une des saisons sèches est très courte et insuffisante pour amener la dessiccation du sol ; la deuxième peut durer

(1) Op. cit., cf. 1ère partie, p. 173.

deux mois. Ce type de climat est très répandu au voisinage de l'Equateur : Gabon, une partie de la cuvette congolaise, Cameroun méridional, basse Côte d'Ivoire, etc.. L'altitude amène un abaissement notable de la température, mais au-dessous de 1 000-1 200 m, le type de climat n'est pas fondamentalement modifié.

Les sols formés sous ce climat reçoivent des quantités d'eau très fortes, bien supérieures à l'évapo-transpiration. Le drainage local (nature des matériaux originels et micro-relief) et régional (géomorphologie) ont donc une grande importance sur la genèse des sols. Ceux-ci restent humides pendant la quasi-totalité de l'année. La matière organique s'accumule peu, malgré la masse de matière végétale tombant sur le sol, car la minéralisation est très active. Très souvent, la différence entre le niveau de l'altération et le niveau de base est faible ; il peut en résulter une certaine gêne pour l'évacuation des produits de l'altération des minéraux, surtout à la base des profils.

**Le régime tropical** intéresse des zones situées généralement au sud ou au nord des précédentes. Il est caractérisé par une saison des pluies et une saison sèche. Les climats tropicaux sont considérés humides si la saison sèche ne dépasse pas six mois et si la pluviométrie demeure supérieure à 1 200 mm. La température moyenne est de 26 à 28°.

Une pareille alternance entraîne pour le sol des conditions nouvelles. S'il est mouillé pendant une grande partie de l'année, il ne reçoit plus d'eau pendant de nombreux mois. L'approvisionnement en matière organique demeure élevé (au moins sous forêt), l'accumulation sera modeste en raison d'une minéralisation encore très active. L'altération des minéraux primaires est encore forte. Mais, sauf en présence de matériaux très perméables, elle ne s'étend pas aussi profondément que dans les cas précédents. L'évaporation est forte et l'emporte parfois sur le drainage. Dans tous les sols précédents, on pouvait avoir à la fois hydroxydes d'aluminium et kaolinite. Désormais, ces hydroxydes d'aluminium sont absents et, seule, la kaolinite est formée. Peu à peu, on verra apparaître des minéraux à trois couches. Les conditions dominantes ne sont plus celles de l'humidité et de l'hydrolyse, et peu à peu se rapprochent de celles de l'aridité.

**Climats humides et frais.** Ils caractérisent des régions d'altitude moyenne (1 000 à 3 000 m). La température a nettement diminué et peut descendre à 10-12°, mais la pluviométrie demeure forte. Souvent, elle peut être plus élevée à 1 200-1 500 m d'altitude qu'au niveau de la mer : des masses montagneuses se dressent sur le passage des vents dominants humides et déterminent des précipitations très fortes (Montagne d'Ambre à Madagascar, Mont Karthala aux Comores, Mont Cameroun, volcans des Hawaii, etc.). On peut retrouver dans ces zones des distributions pluviométriques analogues à celles observées à basse altitude et avoir des climats équatoriaux ou tropicaux d'altitude. La diminution de la température n'est pas suffisante pour modifier profondément la pédogenèse ; l'augmentation de la pluviométrie compense largement cette diminution.

L'altération des minéraux est toujours très poussée. L'évacuation des produits de l'altération est généralement beaucoup mieux assurée qu'à basse altitude en raison d'une topographie souvent très tourmentée et de la différence importante qui existe entre le niveau de l'altération et les niveaux de base locaux. Le "soutirage" des produits de l'altération sera presque toujours très bien assuré, en tout cas, beaucoup mieux qu'à basse altitude. De plus, la diminution de la température, s'accompagne d'une accumulation de la matière organique nettement plus marquée qu'aux niveaux inférieurs. Les sols renferment de plus en plus de matière organique. A Madagascar, (SEGALIN, 1957), par exemple, à 1 200-1 400 m, des teneurs de 3 à 7 % sont fréquentes ; à plus de 2 500 m, on atteint très souvent 20 % (1).

**Les climats "subhumides" et frais.** Cet adjectif, volontairement imprécis, est utilisé pour indiquer une diminution notable de la pluviométrie. Les précipitations de 2 ou 3 m et davantage qu'on observait à moyenne altitude, n'atteignent plus, en haute altitude, que 0,5 à 1,5 m. La température s'est abaissée très fortement. Peu à peu, on voit apparaître un climat semi-humide

---

(1) Op. cit., 1ère partie, p. 175.

à semi-aride de type tropical d'altitude. Aux altitudes extrêmes apparaissent les neiges permanentes. Par une succession de sols à croûte calcaire, de sols bruns variés, de sols podzoliques, voire de podzols, on atteint les rankers et les sols minéraux bruts. On a quitté définitivement le milieu tropical (cf. REYNDERS, 1964 ; SEGALIN (1), 1957).

### 1.2.3 - La végétation de la zone intertropicale humide

Le type de peuplement fondamental de cette partie de la zone intertropicale est la forêt dense. Celle-ci peut, suivant les modalités du climat (pluviométrie, température, répartition de la pluie au cours de l'année, etc..) revêtir des aspects particuliers qui ont reçu des appellations fort différentes. La forêt **dense sempervirente** correspond aux climats équatoriaux. Les arbres sont très élevés (souvent 30 m). La voûte normalement continue est percée par des espèces encore plus élevées, à la recherche du soleil. Le sous-bois est plus ou moins dense, les graminées rares, à longues feuilles. La forêt **dense semi-décidue**, puis la forêt **décidue**, correspondent à des climats où la saison sèche devient de plus en plus longue. Les arbres tendent à devenir moins élevés, avec un port moins droit. La chute des feuilles s'opère à la saison sèche, à peu près partout en même temps pour la plupart des espèces.

En altitude, la diminution de la température entraîne une diminution de la hauteur des arbres ; le port est plus rabougri. Les mousses, lichens, fougères, deviennent particulièrement abondants. Si la pluviométrie diminue encore, on observe à Madagascar des forêts sclérophylles, en Amérique centrale des forêts de pins et d'autres gymnospermes.

La description précise de ces divers types de forêts peut être trouvée dans les ouvrages de spécialistes (AUBREVILLE, 1947, 1949 ; KEAY, 1952 ; LETOUZEY, 1958 ; MANGENOT, 1950, 1955 ; MIEGE, 1955 ; SCHNELL, 1950 ; TROCHAIN, 1940 ; etc..) pour l'Afrique, HUMBERT (1927) PERRIER de la BATHIE (1921) pour Madagascar. Les cartes du tapis végétal du monde (GAUSSEN et coll.) et de l'Afrique occidentale (ROBERTY, 1964). On a une répartition assez régulière des types de forêt en fonction du climat ; mais celle-ci peut être partiellement modifiée par des particularités du sol, soit plus humide, soit plus sec que la normale. Il n'est guère, dans la zone intertropicale humide, de station humide (marais), ou sèche (dune fossile, coulée volcanique récente) qui ne puisse porter de végétation arborée.

Mais tous les types de végétation arborée précédemment énumérés peuvent être modifiés de façon radicale par l'homme qui, aidé de la hache et du feu, va s'attaquer à cette végétation primaire pour développer des cultures ou des pâturages. HUMBERT (1927), PERRIER de la BATHIE (1921), AUBREVILLE (1949), SILLANS (1958), HARROY (1944), etc.. ont montré de manière précise comment les peuplements primaires cédaient la place aux forêts secondaires, puis aux savanes (arbres et herbes en mélange) ou aux prairies et pseudo-steppes. En Afrique et à Madagascar, la destruction de la forêt primaire est une opération en cours depuis fort longtemps ; la végétation telle qu'on l'observe de nos jours est le résultat de l'évolution humaine au cours des derniers millénaires (CORNEVIN, 1963, 1964 ; PAYNE, 1964).

### 1.2.4 - Les roches-mères

Au paragraphe 1.1, on a vu que les surfaces d'érosion couvraient des superficies considérables dans l'ensemble des continents de la zone intertropicale. Les roches qui leur correspondent sont essentiellement des roches plutoniques (granites le plus souvent) et métamorphiques. Dans cette dernière catégorie, la diversité est considérable, depuis les migmatites jusqu'aux roches peu métamorphisées. Tout cet ensemble subit les altérations et les néogenèses qui aboutissent à la formation du sol. La pénétration de l'eau est facilitée par les diaclases, par le litage des minéraux, par la

---

(1) Op. cit., 1ère partie, p. 175.

texture, etc.. Elle aboutit à des altérations très profondes. Pour des causes encore assez mal définies, certaines zones granitiques échappent à cette altération et subsistent intactes, en "pains de sucre" à pentes abruptes. Ces inselbergs sont connus dans toute la zone humide : Brésil, Afrique, Madagascar. Nos connaissances sur leur genèse sont encore incomplètes mais ont progressé récemment grâce aux travaux de MABBUTT (1952), BIROT (1962), HURAUULT (1963)..

Les roches volcaniques acides sont peu étendues. Par contre, les roches basiques sous leurs diverses formes : nappes fluides des plateaux, coulées filiformes des vallées, projections et matériaux pyroclastiques de toutes sortes, sont fréquentes au Brésil, en Argentine, au Cameroun, en Afrique de l'Est et du Sud, aux Indes, etc.. Lors de leur mise en place, ces roches constituent un milieu sec, du fait de leur grande perméabilité (fissures, prismation, cavernes sous-basaltiques ; les cendres et lapilli se comportent comme du sable, etc..). De ce fait, elles sont colonisées en premier lieu par des végétaux xérophytiques. De plus, elles sont constituées de minéraux considérés comme facilement ou très facilement altérables. Une fois l'altération commencée, elle se poursuivra activement du fait de l'évacuation facile des produits dissous. De plus, certains édifices volcaniques constituent, par leurs pentes fortes et leur porosité, des milieux en drainage excessif (comme aux Comores ou au Mont Cameroun).

Les roches calcaires ou marneuses sont assez peu représentées et leur transformation en sols est encore incomplètement connue. Elles existent sur la bordure des continents, au Gabon, au Congo, dans la partie occidentale de Madagascar. L'altération des calcaires s'y effectue sous forme de lapiez et les matériaux résultant de la dissolution du calcaire ne s'accumulent pas en surface et vont se perdre en profondeur dans les diaclases.

Les sédiments continentaux sont souvent importants. Sous forme de sables, de sables plus ou moins argileux, de grès divers, ils occupent des surfaces considérables à Madagascar, en Afrique ("carapaces sableuses", "continental terminal", etc..). Ces matériaux constituent des milieux très perméables à l'origine. Déposés depuis le pliocène (à Madagascar) ou le quaternaire, ils ont pu s'altérer depuis un nombre élevé d'années. Il faut des coupes très profondes (une vingtaine de mètres parfois) pour atteindre le matériau originel.

D'autres zones du globe ont été soumises récemment (à partir de la fin du secondaire ou du tertiaire essentiellement) à des orogénèses ; elles sont très fortement soulevées, plissées, faillées, etc.. sur de très longues distances mais d'assez faibles largeurs. Il s'agit surtout des chaînes de la bordure occidentale de l'Amérique, de l'Asie du sud-est, de l'Indonésie, etc.. Les roches de ces zones peuvent se ramener à deux types : les calcaires et les basaltes (certes, granites et gneiss existent aussi, mais leur valeur pédogénétique est sensiblement la même que précédemment). Les orogénèses d'Amérique ont été accompagnées par des éruptions volcaniques très importantes qui se sont manifestées de toutes les façons possibles, nappes, coulées, cendres, édifices très petits ou gigantesques. Ici, comme dans le cas précédent, les deux caractéristiques essentielles demeurent perméabilité et altérabilité. Les îles d'Indonésie, du Pacifique, des Océans Indien ou Atlantique sont constituées de ces matériaux.

Dans les chaînes de montagne d'Amérique tropicale, le calcaire est une des roches-mères les plus fréquemment rencontrées. Cette roche, placée très haut au-dessus de la nappe phréatique, est parcourue par de nombreuses diaclases qui en font un milieu très perméable et facilement sec. Pour peu que le résidu soit important, après la dissolution du calcaire, une pédogenèse va se développer à partir de ce résidu. Au Mexique, des sols très épais dérivent de calcaire dans la partie montagneuse de la zone équatoriale.

### **1.2.5 - La géomorphologie**

L'étude de la géomorphologie des continents de la zone intertropicale fait apparaître deux types de relief de nature très différente : les chaînes de montagne plissées s'élèvent à l'extérieur des masses continentales, comme les chaînes américaines par rapport au "continent" brésilien, les Atlas par rapport au reste de l'Afrique, l'Himalaya par rapport à l'Inde péninsulaire. Certains pays toutefois ne sont occupés que par des chaînes de montagnes : Amérique centrale, Indonésie, Asie du sud-est, en étroite association avec un volcanisme très actif. Du fait de leur très grande altitude, une partie de ces chaînes échappe à la zone intertropicale et appartient aux zones où le climat est de type méditerranéen ou tempéré ; quoi qu'il en soit, l'évacuation des produits libérés au cours de la pédogenèse ne pose guère de problèmes.

Le reste des masses continentales, non plissées, et émergées depuis l'orogénèse hercynienne (si l'on excepte la transgression cénomaniennne) a pu être soumis à des mouvements épirogéniques, à des jeux de failles, des cassures, des soulèvements en bloc, à des empilements de laves, mais une de leurs caractéristiques essentielles est d'avoir été soumises à une succession d'aplanissements généralisés. Si bien que l'ensemble du pays paraît occupé par un système de marches d'escalier gigantesques.

En Afrique, en particulier, certaines parties du pays sont aplanies à un tel point que l'on peut (comme au Cameroun central) effectuer 6 à 800 km d'est en ouest sans que l'altitude varie de plus de 100 m. Ces faits n'ont pas manqué de frapper les géomorphologues qui se consacrent à l'étude des paysages africains.

### Quelques caractéristiques des surfaces d'aplanissement

#### a - Relations entre la surface et le niveau de base local

Dans un grand nombre de zones planes d'Afrique (centre et sud Cameroun, par exemple), la différence de niveau entre le sommet de la surface et le fond des thalwegs est assez faible. Le fond des vallées est plat et draine très mal. La pluviométrie étant généralement forte et bien répartie, il en résulte une évacuation globale de l'eau assez lente. Les profils sont plus ou moins gorgés d'eau, du moins à la base, et l'on voit se développer des horizons tachetés. Sans avoir de véritables sols hydromorphes, l'on a des sols où les produits d'altération des minéraux, la silice en particulier, sont médiocrement évacués. Ceci peut être schématisé par la figure n° 10, présentée par PRUNET (1949) et reprise par ROUGERIE (1960).

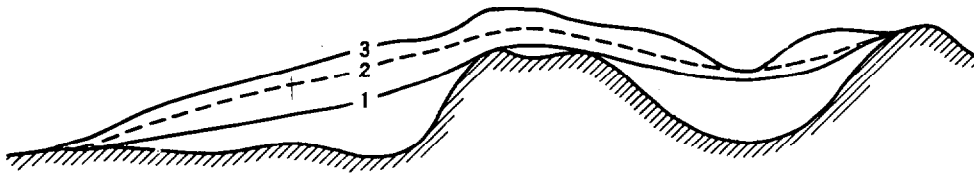


Fig.10. Relations entre la nappe, la roche et le relief.

1 - niveau des basses eaux, 2 - niveau des hautes eaux, 3 - relief

Les sols sont riches en kaolinite et pauvres en gibbsite. C'est ce qu'on observe en Côte d'Ivoire méridionale, en Nigeria, au Cameroun, au Congo, en Guyane, etc..

Dans les régions comme Madagascar et le centre Cameroun, la différence entre la surface et les fonds des talwegs qui la découpent est beaucoup plus forte (110 à 250 m sur les Hauts Plateaux). Il s'ensuit que, même si les fonds de vallée drainent assez mal, il n'en sera pas de même sur les pentes et les marques de l'hydromorphie n'y apparaissent pas, si ce n'est aux bas des pentes. Le milieu est donc moins favorable au développement de la kaolinite ; la gibbsite est un minéral fréquemment observé et très souvent abondant (SEGALEN, 1956) (1).

#### b - développement des versants

Si certaines surfaces sont assez bien conservées et ont été peu entamées par l'érosion, il subsiste alors des superficies planes plus ou moins étendues. Ceci se produit lorsque ces surfaces ont été "figées" par un sédiment résistant, ou bien par une cuirasse. Mais, dans la plupart des cas, les cours d'eau, par recul des têtes, arrivent à les tronçonner, les morceler, à isoler des portions qui vont peu à peu disparaître.

Dans les pays à pluviométrie faible en valeur absolue, mais à pluies violentes, à couverture végétale rare ou clairsemée, la désagrégation des roches est un processus prépondérant. On

(1) cf. 1ère partie, Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie, 1965, III, 2, p. 167.

assiste au développement de versants de forme concave décrits par de nombreux auteurs comme KING (1961, 1963), RUHE (1954), TRICART et CAILLEUX (1965). On observe d'abord un escarpement à pente très forte se raccordant à un pédiment souvent étendu. A mesure que l'on pénètre dans la zone tropicale humide, l'altération l'emporte sur la désagrégation. De plus, l'abondance de la végétation devient un frein à l'évacuation des fragments qui s'altèrent sur place. Des quantités importantes de produits sont évacués sous forme dissoute (bases et silice), un peu sous forme dispersée (argile), très peu sous forme grossière. Le versant à forme concave des pays secs est remplacé par un versant d'abord convexe puis concave (versant "dégénéré" de KING, 1963). Ce versant, schématisé à l'extrême, peut revêtir des aspects divers en liaison avec la nature de la roche-mère et le stade de l'altération (ROUGERIE, 1960).

### **c - Raccord d'une surface à l'autre**

Le recul des têtes des cours d'eau détermine la formation de versants à pentes fortes. La formation d'une surface d'érosion progressant à partir d'un certain niveau de base provoque l'attaque du relief préexistant. Si celui-ci est une surface d'érosion plus ancienne, on peut avoir entre les deux surfaces une dénivellation assez brutale de plusieurs centaines de mètres. Le raccord entre deux surfaces pourra se faire aussi par l'intermédiaire d'une topographie très tourmentée, d'où sans doute aux inégalités de l'altération ; on nommera ce raccord, relief intermédiaire (P. MICHEL, 1959).

### **1.2.6 - Hydrologie** (cf. Annuaire Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. et E.D.F. (1964), BIROT (1965).

Le comportement des eaux de surface intervient lui aussi, dans la nature du contenu minéral du sol. La répartition des pluies (ainsi que leur importance absolue), la nature de la topographie, du couvert végétal, influent sur l'action de l'eau sur le sol.

Dans le sud du Cameroun, le bassin versant du Nyong est situé tout entier dans la zone de forêt dense ombrophile, sur une surface d'érosion très peu accidentée. A Mbalmayo, pour une pluviométrie de 1 460 mm, on note un coefficient d'écoulement de 20,8%. On est amené à penser que l'eau qui n'est pas évacuée par écoulement doit être transpirée par la forêt. A Lolodorf, sur la Lokoundjé, sous un climat et une couverture végétale identiques, mais avec une topographie plus tourmentée, le coefficient d'écoulement est plus élevé, 36%. Sur la côte est de Madagascar, couverte de forêt, mais très accidentée, le coefficient d'écoulement est encore plus élevé (70%).

Ces quelques chiffres, certes peu nombreux, montrent que dans le premier cas, l'élimination de l'eau par gravité est assez faible et elle séjourne dans le sol beaucoup plus longtemps. Sans qu'il y ait hydromorphie à proprement parler, les solutions contenant de la silice, resteront présentes suffisamment longtemps pour permettre la resiliification des hydroxydes. Par contre, en région montagneuse, les eaux seront évacuées hors du sol surtout par gravité, entraînant les produits dissous.

En résumé, la partie humide de la zone intertropicale est caractérisée par les faits suivants :

Le climat est très régulièrement chaud. La pluviométrie est souvent élevée (plusieurs mètres) et tombe presque toute l'année près de l'équateur. En se dirigeant de l'équateur vers les tropiques, l'alternance saisonnière s'accroît et on peut avoir une saison sèche très poussée. En altitude, on assiste souvent à une augmentation de la pluviométrie, tandis que la température diminue. Au-dessus de 3 000-3 500 m, on assiste à une certaine diminution de la pluviométrie.

La végétation est essentiellement arborée à l'origine. Différents types de forêts reflètent les variations climatiques, tandis que la hauteur et la persistance de la nappe phréatique peuvent provoquer l'installation de types différents. Cette végétation forestière est peu fragile dans la zone équatoriale ; elle l'est beaucoup plus dans la zone à saisons bien tranchées, où une longue saison sèche peut être un obstacle à la réinstallation d'un couvert forestier détruit.

Toutes les roches-mères sont théoriquement possibles, mais, sur les boucliers, les roches métamorphiques, plutoniques et les sédiments continentaux (grès, sables) sont les plus abondants, associés à des roches volcaniques. Dans les chaînes de montagnes plissées et les îles isolées, calcaire et basalte dominant largement.

D'immenses surfaces ont été façonnées par des actions essentiellement continentales abou-



tissant à des surfaces d'érosion situées à des altitudes très différentes, où l'érosion agit beaucoup plus par recul des versants que par abaissement des surfaces. Ces surfaces peuvent être diversement drainées. D'autres zones, portées à très forte altitude, présenteront un drainage bon et parfois excessif.

## 2 - La pédogenèse dans la zone intertropicale humide

Dans la zone étudiée règnent une forte pluviométrie et une température élevée. Les minéraux solubles sont dissous rapidement. Les autres minéraux sont altérés essentiellement sous l'action du processus d'**hydrolyse** dû à la dissociation en ions de l'eau (1). La végétation arborée fournira en abondance de la matière organique qui, en se minéralisant rapidement et activement, enrichit les eaux de percolation en acide carbonique.

Cette eau de percolation vient au contact des minéraux primaires qui sont, à plus ou moins brève échéance, attaqués. Les bases alcalines et alcalino-terreuses sont éliminées ; la silice est enlevée à son tour. La formation en abondance d'hydroxydes est donc à prévoir dans les zones les plus pluvieuses et la genèse de minéraux argileux lorsque la pluviométrie vient à diminuer. Mais, la géomorphologie, en réglant l'évacuation des eaux contenant de la silice, donc le drainage, est responsable également pour une large part de la présence ou de l'absence des minéraux argileux.

Les sols qui se développent dans ces conditions sont des sols ferrallitiques (AUBERT, 1954). Plusieurs groupes et sous-groupes sont possibles.

Dans les pages qui suivent seront présentés les sols observés dans les grandes subdivisions de la zone intertropicale humide. L'on examinera les minéraux ainsi formés et l'on discutera des causes de leur formation.

### 2.1 - LES SOLS DE LA ZONE CHAUDE ET HUMIDE EN PERMANENCE

Cette zone correspond essentiellement au climat équatorial à une ou quatre saisons, où la pluie est forte et assez bien répartie sur toute l'année, sans saison sèche notable ou avec des périodes sèches courtes. Géographiquement, elle correspond en particulier à la bordure du Golfe de Guinée (sud de la Côte d'Ivoire, sud-ouest du Cameroun, à une partie du Gabon et de la République du Congo), à la côte est de Madagascar, à la côte nord-occidentale de l'Amérique du Sud (Guyanes), etc. . . Partout, la végétation naturelle est la forêt dense ombrophile qui se régénère assez facilement lorsqu'elle vient à être détruite. Dans certaines zones limitées, sur sables, sa régénération paraît difficile, en raison de la pauvreté du matériau, des cultures et de la présence de populations ; mais on ne peut dire qu'elle soit compromise.

Les sols se développent à partir de roches variées : granites et roches métamorphiques du socle africain, du socle guyanais ou malgache, matériaux sédimentaires divers, en bordure des océans. Dans certains endroits (Madagascar, Cameroun) des roches volcaniques, basiques ou acides, occupent des superficies importantes.

Du point de vue géomorphologique, les sols se développent sur des surfaces d'érosion qu'on peut rattacher surtout au tertiaire ou au quaternaire. Dans la plupart des cas, le réseau hydrographique est peu profondément implanté. Il en résulte qu'à une humidité intense, d'origine atmosphérique, s'ajoutera pour les sols une humidité due à un drainage régional imparfait. Par contre, à Madagascar, sur le versant oriental, aux pentes fortes, le drainage est meilleur, comme dans les régions montagneuses du Cameroun, des Andes ou de Birmanie.

Les sols qui se développent dans ces conditions appartiennent au groupe des sols ferrallitiques désaturés. On les observe surtout sur une roche-mère granito-gneissique mais aussi sur roches volcaniques, sables, etc. . .

---

(1) Il va de soi que : hydratation, oxydation, dissolution, etc. . . interviennent également.

Du point de vue morphologique, leur horizon A<sub>1</sub> est généralement peu important et présente une structure fine ; l'horizon B (1) est argilo-sableux, avec très peu de limon. On peut y noter des concrétions, des fragments de cuirasse, des cailloux de quartz... La couleur est généralement jaune à brun-jaunâtre ; la structure est parfois grumeleuse fine et souvent difficile à définir, car le sol est presque toujours observé humide ; mais à l'état sec il est souvent friable. La base de l'horizon est presque toujours tachetée, attestant des conditions de drainage imparfait. L'horizon C est souvent difficile à observer.

Les sols dérivés de sables et matériaux sablo-argileux côtiers ont une morphologie présentant quelques particularités. L'horizon A<sub>1</sub> est beaucoup plus marqué, et la matière organique pénètre, dans le matériau sableux, beaucoup plus loin. L'horizon B est très profond, mais présente une couleur jaune-orangé qui rappelle celle des sols précédents.

Certains auteurs décrivent dans cette même zone climatique, des sols "Red-Yellow podzolic" présentant un horizon humifère rappelant un peu celui des podzols au-dessus d'un horizon A<sub>2</sub> limité (MOORMAN et PANABOOKE, 1961).

Tous ces sols présentent, parmi leurs caractéristiques essentielles, une désaturation très poussée (le degré de saturation est inférieur à 10% le plus souvent, avec une somme de bases fixées sur le complexe inférieure à 1 méq/100 g), une acidité très forte ; pH 4 à 4,7. Ils doivent ces propriétés à la pluie continue dont les eaux percolent en permanence à travers le sol. Le peu de bases dont ils disposent doit provenir de la matière végétale qui se minéralise très rapidement.

Lorsqu'on examine le contenu minéral de ces sols, on constate que, en ce qui concerne les minéraux alumineux, la kaolinite domine très largement, avec des teneurs modestes, et parfois nulles en gibbsite. L'illite a été notée, mais elle est rare et liée à des roches-mères particulières et proches de la surface. CHATELIN (1964) note des sols à illite dans les horizons supérieurs de sols dérivés de séricito-schistes au Gabon.

LEVEQUE (1963) en Guyane, signale la présence de kaolinite ou de métahalloysite, de gels et de gibbsite. Cet auteur constate que, lorsque le sol paraît normalement drainé, le rapport silice/alumine est compris entre 1,1 et 1,4. Lorsque des horizons tachetés apparaissent, indiquant que le drainage est moins bon, ce rapport remonte à 1,7 ou même à 2,0. Le crochet caractéristique de la gibbsite à 330° (analyse thermique différentielle) disparaît. On note également que la répartition du contenu minéral varie avec la profondeur (rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> constant, croissant ou diminuant avec la profondeur), mais l'auteur ne fait pas de rapprochement avec le type de drainage. Cependant, ses observations concordent avec celles de J. B. HARRISSON (2) qui avait bien observé que la gibbsite pouvait apparaître dès la base des profils pour disparaître ensuite par silicification. Au Gabon, CHATELIN (1964) constate que, sous ce même type de climat, les sols sont riches en kaolinite avec des teneurs modestes en gibbsite et un rapport silice/alumine souvent proche de 2,0. Au Cameroun, BACHELIER (1959) trouve des résultats analogues. A Ste-Marie (Madagascar), VIEILLEFON (1961) note également des rapports entre 1,5 et 2,0 suivant les types de roches. A Ceylan, KALPAGE, MITCHELL et MITCHELL (1963) observent que sur les zones planes, on ne note que de la kaolinite ; lorsque la pente dépasse 10% sur des collines de plus de 150 m, on voit apparaître de la gibbsite en quantité modeste.

Dans cette même zone climatique, lorsque l'on examine des sols dérivant de roches-mères basiques, on note que, morphologiquement, les sols sont assez différents. La couleur, rouge à rouge sombre, est dominante (explicable par une beaucoup plus forte quantité de produits ferrugineux). Toutefois, la présence de gibbsite est constante et la teneur souvent très forte. Ces caractères peuvent s'interpréter par l'altérabilité plus rapide des minéraux des roches, leurs faibles teneurs en silice, et surtout par les conditions générales de drainage meilleures. En Guyane, LEVEQUE (1963) note que les dykes de dolérite dépassant le niveau général de la plaine portent des sols où le rapport silice/alumine est plus bas que pour les sols dérivant de granites. A Madagascar, près d'Antalaha, un plateau basaltique horizontal présente une altération gibbsitique au contact de la roche. Par contre, dans toute l'épaisseur du sol, cette gibbsite a disparu et fait place à de la kaolinite. A quelque distance, sur un versant bien drainé, le sol présente un rapport silice/alumine de 0,8

---

(1) Au sens large.

(2) Op.cit., 1ère partie, p. 175.

indiquant de fortes quantités de gibbsite. Enfin, la présence de gibbsite n'est pas liée à un type de roche, puisque entre Manakara et Mananjary des dacites et dellénites donnent également naissance à des sols très riches en gibbsite (SEGALEN (1), 1957). CRAIG et HALAIS (1934), HALAIS (1946) à l'île Maurice, TANADA (1951) aux Hawaïi, observent sous des pluviométries très élevées de fortes teneurs en gibbsite dans des sols dérivés de roches basiques.

Enfin, signalons que, au cours d'une tournée effectuée au Cameroun occidental, dans une région particulièrement humide (jusqu'à 10 m par an), SIEFFERMANN a pu montrer que des sols profonds développés sur matériaux basaltiques ne contenaient que des produits kaoliniques, sans hydroxydes d'alumine.

**Discussion** - Dans la zone chaude et humide en permanence, par suite de l'abondance de la pluie, l'hydrolyse des minéraux primaires est très poussée. Les bases sont éliminées en quasi-totalité entraînant une très forte acidification du sol et un degré de saturation très faible. La petite quantité de bases qui subsiste doit participer au circuit fermé entretenu par la végétation forestière.

La gibbsite apparaît dans presque tous les sols mais, en général, en quantité modeste. L'importance de ce minéral peut être mise en relation avec la qualité du drainage, à la fois sur roche basique et acide. Par contre, la kaolinite (*sensu lato*) est largement dominante et parfois existe seule. Plusieurs explications peuvent rendre compte de cet état de choses :

a - Même sans hydromorphie, en raison d'une topographie plane, les solutions du sol contenant de la silice sont mal éliminées, permettant une recombinaison quasi immédiate de la silice avec la gibbsite. C'est le cas des sols d'Antalaha sur basalte, et de Guyane sur roches métamorphiques du socle, où la gibbsite est mise en évidence au contact de la roche-mère.

b - Le milieu humide en permanence est favorable au maintien de la kaolinite. L'absence de l'alternance d'humectation et dessiccation ne permet pas la rupture de la structure kaolinique. La présence d'eau permet sans doute à la réaction (3) de WOLLAST (2) de se produire dans le sens silice et hydroxyde mais l'élimination incomplète et lente des solutions permet la recombinaison immédiate.

c - La présence en abondance de quartz dont la solubilité est faible, certes, mais non négligeable doit, dans certains cas, approvisionner les solutions en silice, lorsque le drainage est médiocre et l'eau abondante, et faciliter la synthèse de la kaolinite.

## 2.2 - LES SOLS DE LA ZONE A SAISONS ALTERNANTES

On peut y distinguer les deux sous-zones suivantes :

- a - basse altitude (moins de 1 500 m) où la température demeure généralement élevée ;
- b - altitude moyenne (1 500-3 000 m) où la température est nettement plus fraîche mais où la pluviométrie peut être assez élevée.

**a - Zone de basse altitude.** Cette zone est généralement située à une certaine distance des côtes. C'est le cas de l'Afrique de l'Ouest, mais non de Madagascar.

La **végétation naturelle** est normalement de type forestier mixte (mésophile). En raison de la longueur de la saison sèche, les formations primaires naturelles une fois détruites par la hache ou le feu ont du mal à se reconstituer et sont remplacées de façon durable par la savane. Le **climat** va du régime équatorial au régime tropical franc à deux saisons très tranchées. La pluviométrie se situe entre 1 et 2 m ; exceptionnellement elle peut atteindre 3 à 4 m. Mais la caractéristique essentielle reste l'alternance de périodes très humides et de périodes souvent fort longues et sèches. La température demeure élevée et varie de 23 à 27° en moyenne annuelle. Les **roches-mères** sont à peu près les mêmes que dans la zone précédente. Les roches métamorphiques et plutoniques sont encore très abondantes mais on voit apparaître les sédiments continentaux sableux ou sablo-argileux

---

(1) Op. cit., 1ère partie, p. 175.

(2) Op. cit., 1ère partie, p. 176.

connus sous le nom de "carapaces sableuses" ou "continental terminal". Les roches volcaniques basiques peuvent encore être localement importantes. La **géomorphologie** n'est pas sensiblement différente et l'aplanissement demeure une caractéristique majeure de la topographie. Les surfaces peuvent être plus ou moins morcelées par l'érosion et la différence entre le sommet des surfaces et le niveau des nappes demeure assez faible.

Les sols qui se développent dans cette zone appartiennent encore aux sols ferrallitiques. Les minéraux primaires subissent une décomposition très poussée avec enlèvement à peu près complet des bases, désaturation importante du complexe et enlèvement de la silice. La matière organique se minéralise rapidement et les teneurs demeurent basses avec des rapports C/N voisins de 10.

Les sols appartiendront aux groupes des sols ferrallitiques typiques ou bien à celui des sols ferrallitiques indurés. Au point de vue morphologique, ces sols ont été abondamment décrits dans la littérature pédologique : AUBERT (1954), DUCHAUFOR (1960), ERHART (1933), KELLOGG et DAVOL (1949), SEGALIN (1957), STEPHENS (1953), etc.. Dans les sols ferrallitiques typiques l'on retiendra que l'horizon A est généralement peu épais : 10 à 25 cm, généralement bien structuré, avec ou sans concrétions, avec ou sans nappes de pierres à sa base, avec des teneurs modestes en carbone organique. L'horizon B est d'épaisseur variable : un à plusieurs mètres, le plus souvent de couleur vive (rouge), parfois aussi jaune ou brun. La texture dépend largement de la roche-mère : très argileuse si c'est un calcaire ou un basalte, argilo-sableuse en cas de granite ou de gneiss. Le taux de limon est souvent très faible. La structure est très fine : grumeleuse fine, farineuse disent certains ; souvent également, elle n'est pas bien développée et en saison sèche peut présenter quelques fentes de retrait. Dans cet horizon de concentration, on trouve de fortes quantités de fer et/ou d'alumine. L'horizon C est irrégulier et dépend en grande partie de la roche-mère. Sur calcaire, cet horizon peut manquer totalement. Sur basalte, il est très variable : lorsque le sol est peu développé, cet horizon peut se ramener à quelques centimètres. Par contre, on peut avoir plusieurs centimètres ou même plusieurs mètres de matériau fortement altéré. Dans le cas de roches grenues, cet horizon peut être très important, dix mètres et plus ; les minéraux autres que le quartz sont profondément altérés et s'écrasent facilement sous les doigts.

Lorsqu'on examine le contenu minéral de ces sols, on constate qu'il n'est pas rare d'en trouver ayant des teneurs appréciables en gibbsite sur des roches-mères variées. Naturellement, comme dans la zone précédente et pour les mêmes raisons, les sols dérivés de roches basiques renferment les quantités les plus importantes de ce minéral. C'est ce qu'ont montré HARDY et FOLLETT-SMITH (1931), HARDY et RODRIGUES (1939), BONNET (1939), dans différentes îles des Antilles où les sols dérivent d'andésites. En Afrique du Sud, VAN DER MERWE et HEYSTEK (1952) montrent que pour une gamme variée de roches-mères, les sols sont riches en gibbsite et kaolinite. FOCAN et CROGAERT (1954) décrivent divers sols dans la région des Uele au Congo ; il s'agit de "latosols" jaunes ou rouges, développés sous une forêt ombrophile passant à la forêt tropophile avec le plus souvent la savane. FRIPIAT, GASTUCHE, COUVREUR et FOCAN (1954) ont étudié les argiles de ces sols. Ils n'ont trouvé que de la kaolinite dans les sols de la cuvette centrale et ceux du centre Uele. Par contre, dans le nord-ouest où des débris de cuirasse abondent, la teneur en gibbsite augmente. Ces mêmes auteurs ont étudié les argiles de sols de la région du Kaniama, au sud du Congo. Ils ont trouvé un peu d'illite, mais surtout de la kaolinite parmi les minéraux argileux. Les teneurs en gibbsite étaient peu importantes mais constantes.

**Discussion** - Dans cette zone climatique, la température et la pluviométrie élevées provoquent, comme dans la zone précédente, une hydrolyse poussée des minéraux des roches, entraînent le départ des bases et de la silice. La gibbsite prend naissance aux dépens des minéraux primaires ou de la kaolinite lorsque le soutirage de la silice est bien assuré. Ceci a bien lieu sur les zones volcaniques et sur les roches acides lorsque la topographie est assez tourmentée (rarement sur les surfaces planes étendues), mais plutôt sur reliefs intermédiaires. L'alternance saisonnière permettra également de faire intervenir un mécanisme comme celui invoqué par PAVER et MARSHALL et Mlle GASTUCHE (1) pour individualiser l'alumine par des humectations et dessiccations successives. Par contre, les sols des grandes surfaces planes situées entre 500 et 700 m d'altitude, dérivant de roches acides où le système hydrographique est souvent peu profondément implanté, contiennent des proportions impor-

---

(1) cf. 1ère partie, p. 172.

tantes de kaolinite. On peut encore attribuer ce fait à une élimination imparfaite des solutions qui favorise la synthèse de la kaolinite aux dépens de la gibbsite.

## **b - Zone de moyenne altitude**

Dans ces zones se retrouvent sensiblement les mêmes types de végétation qu'à basse altitude (forêt ombrophile dense mais moins élevée, savanes, pseudo-steppes, etc.). La température est nettement moins forte (12 à 20°) mais la pluviométrie, tout en conservant en moyenne des valeurs peu élevées (1 à 1,8 m) peut parfois augmenter considérablement et dépasser 3 m. Les roches-mères sont les mêmes que précédemment mais les sédiments continentaux sont rares ; par contre, les roches plutoniques et métamorphiques prennent une grosse importance, ainsi que les roches volcaniques. La topographie s'apparente au type montagne ou bien à la surface d'aplanissement fortement incisée, où le réseau hydrographique est très profondément enfoncé. C'est dire que le drainage général est bien assuré, mais cependant, dans certaines zones d'altitude, comme en Haute Guinée, le réseau hydrographique est faiblement implanté et l'hydromorphie est assez accusée. Les sols seront encore des **sols ferrallitiques typiques** présentant les caractéristiques générales précisées plus haut. Toutefois, l'altitude plus élevée (se traduisant par une température plus basse et des pluies plus fortes) détermine une accumulation plus marquée de la matière organique. Celle-ci est de 3 à 4 % à 1 200 m à Madagascar ou au Cameroun. Elle peut atteindre 10 puis 20 % en altitude ; les sols sont alors des **sols ferrallitiques humifères** (1). S'ils ont des teneurs élevées en matière organique, et des horizons A beaucoup plus épais, l'évolution de la matière minérale n'est pas modifiée dans ses grandes lignes. Toutefois, ces sols sont pratiquement toujours en position de bon drainage, donc favorables à une évacuation facile des produits de l'altération des roches. Ceci, joint à une altération intense malgré la baisse de la température, fait que la gibbsite est souvent fort abondante.

### **b. 1 - Sols Ferrallitiques typiques**

Sur les hauts-plateaux malgaches, à 1 200-1 400 m, où la température est de 18°, toutes les roches-mères donnent naissance à des sols où la gibbsite est un des constituants essentiels. Deux à trois cents mètres de dénivellation existent entre le sommet des versants et le cours d'eau représentant le niveau de base. Les gneiss, les granites donnent naissance à des sols où les teneurs en gibbsite sont notables à la partie supérieure des profils, alors qu'il en est rarement ainsi sur les surfaces faiblement incisées des niveaux inférieurs. A Madagascar, toute une gamme de sols ferrallitiques (rouges, jaune sur rouge, etc..) dérivés de granites et gneiss présentent des teneurs appréciables en kaolinite certes, mais aussi en gibbsite. Au Cameroun, les roches gneissiques à 1 000 et 1 200 m d'altitude donnent naissance également à des sols renfermant des quantités importantes de gibbsite. Les roches-mères basiques (basaltes, andésites et roches voisines) présentent des teneurs très élevées en gibbsite. A Madagascar, au Cameroun, les sols ayant les teneurs les plus fortes en alumine hydratée s'observent à cette altitude.

Au Cameroun, l'évolution des sols dérivés de basalte est extrêmement rapide. Un sol rouge, déjà étudié par LAPLANTE (1954) se développe sur une nappe hawaïenne assez récente (quaternaire ancien très probable), puisque l'ensemble des édifices est à peine entamé par l'érosion et présente un aspect de fraîcheur remarquable (BACHELIER et al., 1957, SEGALIN 1956). La teneur en gibbsite, estimée par le crochet endothermique à 330, est déjà très élevée. En Guinée, à une altitude similaire, les sols ferrallitiques sont également riches en alumine. MAIGNIEN (1954) indique qu'à Labé des sols humifères et hydromorphes, présentent au-dessus de la cuirasse un rapport silice/alumine compris entre 0,94 et 2,04. En Afrique du Sud, dans le Drakensberg, VAN DER MERWE (1940) décrit des sols formés sur dolomie, très épais et riches en gibbsite. Aux îles Hawaii, CLINE (1946), puis TAMURA, SHERMAN et JACKSON (1953-6) ont étudié des "ferrugineous latosols" qui renferment des teneurs appréciables en gibbsite.

### **b. 2 - Sols Ferrallitiques humifères**

En moyenne altitude (à 1 500-3 000 m environ), les sols deviennent beaucoup plus riches en matière organique par suite de la diminution de la température et de l'augmentation de la pluviométrie. A Madagascar, entre 1 800 et 2 800 m, les teneurs passent graduellement de 5 à 30 %. Au

---

(1) On peut observer de tels sols à plus basse altitude, 8 à 900 m au Mexique, lorsqu'on a en même temps très forte pluviométrie et richesse en calcium.

Mexique, à 900 m, sur certains versants très pluvieux, on atteint 20 %. Au Cameroun occidental (BRUNT et HAWKINS, 1962) des teneurs de 15 à 20 % ont été observées sur les "High Lava plateaux".

Les sols ferrallitiques humifères sont essentiellement des sols de climat frais et très pluvieux, ce ne sont pas des sols de surfaces planes mais plutôt de montagnes. La roche-mère est le plus souvent basique (basalte), mais ce n'est nullement obligatoire, puisqu'on trouve de tels sols sur des matériaux trachytiques ou gneissiques (Madagascar central). Ces sols contiennent encore de fortes teneurs en hydroxydes d'aluminium (SEGALEN 1957, TAMURA et al. 1953).

**Discussion** - L'augmentation de l'altitude se traduit par une diminution sensible de la température sans que la pluviométrie diminue notablement (dans certains cas, elle augmente). Il en résulte un accroissement dans les teneurs en matière organique qui peuvent atteindre, dans les sols ferrallitiques humifères, des valeurs de 20 à 30 %. Les couleurs des sols passent alors au brun, au brun foncé et même au noir.

Toutefois, la diminution de la température est insuffisante pour modifier de façon notable l'altération des minéraux des roches : kaolinite et hydroxydes sont formés en abondance. L'évaporation de l'eau apportée par les pluies est plus faible qu'à basse altitude et ceci compense largement la diminution des vitesses de réaction dues à l'abaissement de la température.

La topographie est toujours assez tourmentée, les pentes sont fortes, qu'il s'agisse soit d'une topographie montagneuse, soit de surfaces d'aplanissement fortement incisées par les cours d'eau. Dans l'un et l'autre cas, le drainage est très bien assuré et les produits solubles résultant de l'hydrolyse des minéraux sont facilement évacués.

Dans ces conditions, si la kaolinite continue d'être un élément constitutif important de la fraction minérale du sol, la gibbsite est toujours présente et, souvent en quantités élevées dans les sols dérivés de roches-mères les plus variées. En fait, c'est dans cette zone climatique qu'à Madagascar et au Cameroun on observe les teneurs en gibbsite du sol les plus fortes.

### **c - Sols communs aux zones de basse et moyenne altitude**

Dans les zones de basse et moyenne altitude, on peut observer des sols ferrallitiques cuirassés qui, en plus des processus envisagés précédemment, sont intéressés par l'induration qui porte essentiellement sur les oxydes et hydroxydes dans un horizon préalablement enrichi.

D'HOORE (1954) a envisagé les différents cas d'**enrichissement** en hydroxydes : par concentration relative, c'est-à-dire par élimination des constituants non ferrallitiques, des bases, de la silice et parfois du fer (l'accumulation des produits alumineux s'opère essentiellement de cette façon) ; par concentration absolue, c'est-à-dire par l'introduction dans le milieu d'un constituant venu de l'extérieur, généralement le fer. Cuirassement et ferrallitisation ont été longtemps confondus. Ce n'est que récemment que l'on a distingué très nettement les deux processus, avec les travaux de MAIGNIEN (1954.8) et ALEXANDER et CADY (1962)(1). AUBERT (1963) a récemment fait le point des principaux types de cuirasses qu'on pouvait observer.

La cuirasse paraît liée, dans une certaine mesure, à un type de climat à saison sèche bien tranchée. On en observe à basse et à moyenne altitude de manière fréquente. Toutefois, il faut signaler que les cuirasses alumineuses s'observent avec une particulière netteté en moyenne altitude, et parfois même presque à la limite de la zone ferrallitique. D'importantes cuirasses alumineuses existent à 1 100-1 300 m au Cameroun (Adamoua, Bamoun, Bamiléké, etc.). A Madagascar, on en connaît à 1 600-2 000 m d'altitude. Il en existe toutefois à basse altitude (Guyanes : VAN KERSEN, 1956). Il semble donc qu'elles soient assez indifférentes au climat actuel et on est fondé à penser que ces cuirasses sont, dans bien des cas, le résultat d'actions climatiques anciennes et constituent un héritage du passé.

On peut se demander quel est le type de végétation associé aux cuirasses. On peut citer des exemples où la disparition de la couverture forestière est suivie par l'apparition d'une cuirasse (AUBERT, 1950). Un matériau riche en hydroxydes soumis à une dessiccation brutale, durcit en peu

---

(1) Op. cit., 1ère partie, p. 171.

de temps. On trouve également des cuirasses aériennes qui supportent la forêt. Les racines des arbres s'enfoncent dans les interstices, dans les fentes entre les blocs cuirassés. Il paraît s'agir là d'une forêt ayant réoccupé une cuirasse.

Deux positions topographiques préférentielles paraissent être le lieu d'élection des cuirasses : le sommet des plateaux représentant les restes de surfaces d'aplanissement morcelées actuellement par l'érosion et les glacis s'étendant à leur pied. Sur ces glacis, on peut trouver des débris de la surface se trouvant au-dessus, mais la nouvelle cuirasse est le plus souvent ferrugineuse. Par contre, la topographie la plus favorable à l'accumulation et l'induration d'un matériau alumineux est essentiellement le plateau entouré de vallées plus ou moins profondes où le niveau phréatique est bas.

Entre le haut Bafing et la haute Gambie, en Guinée (SABOT 1952, MICHEL 1959), dans l'Adamaoua au Cameroun, des surfaces de ce type sont bien connues. Les géomorphologues assignent à ces surfaces un âge remontant au moins au Crétacé.

A Madagascar existent plusieurs plateaux cuirassés (BESAIRIE 1957, RIQUEUR 1957). Le plateau d'Analovory situé à près de 1 800 m d'altitude représente, dans l'Ankaizinana (BESAIRIE 1933, SEGALIN et TERCINIER 1951), un reste d'une très vieille surface (DIXEY, 1960, la date du jurassique). Elle est constituée d'hydroxyde d'alumine très pur, en très gros blocs. Le plateau est occupé en partie par une forêt en voie de disparition (pour faire place à des pâturages). Les rivières Maevarano et Sofia qui bordent le plateau sur deux côtés coulent à plus de 500 m en contre-bas, circonstance favorable à l'évacuation de la silice et du fer. Deux possibilités ont été avancées pour la formation de cette bauxite : ou bien elle dérive du gneiss sous-jacent, mais alors il faut admettre qu'avec le temps tout le quartz a été dissous, ou bien elle dérive d'un basalte qui se serait étalé en nappe sur le plateau, mais ce basalte n'a pas été retrouvé (EMBERGER, 1957). Aucune cuirasse ferrugineuse n'est visible au voisinage de celle d'Analovory. A quelque distance de là, sur des formations volcaniques assez récentes, où le basalte est bien visible, des cuirasses abondent, mais elles sont ferro-alumineuses.

Au Cameroun, sur le plateau de l'Adamaoua, à 1 300 m environ, des cuirasses riches en aluminium couvrent des surfaces considérables (GUIRAUDIE 1949-53, PLANET 1959). Ces cuirasses occupent des plateaux à bords abrupts ; les rivières coulent en contre-bas à plus de 200 m. Cette situation favorise l'évacuation efficace des solutions ayant traversé le sol. De plus, il s'agit d'une surface très ancienne (crétacée) ; l'altération des basaltes, dont dérivent les cuirasses, a eu le temps de s'exercer pendant une très longue période.

La constitution de ces cuirasses présente une certaine similitude. Les matériaux non alumineux sont les oxydes et hydroxydes de fer. Les minéraux alumineux sont essentiellement kaolinite, un peu de boehmite et surtout gibbsite. MAIGNIEN (1958) donne les constituants de quelques cuirasses de Guinée. Sur quinze échantillons examinés, deux seulement contiennent de la boehmite. DE LAPPARENT et HOCART signalent cet hydroxyde dans les pisolites de la cuirasse de Koulouba au-dessus de Bamako ; la cuirasse de l'Adamaoua en contient également. Ce produit paraît un constituant des pisolites et concrétions, et en tous cas de la partie supérieure des cuirasses. Une déshydratation partielle des produits gibbsitiques pourrait, dans ces conditions, être à l'origine de cet hydroxyde.

**Discussion** - Les cuirasses alumineuses ne paraissent pas liées de manière très étroite aux conditions climatiques actuelles. En raison de l'importance de l'hydrolyse qu'il a fallu mettre en œuvre pour éliminer de manière quasi totale les bases et la silice de la roche-mère, on est en droit de penser à un climat chaud et pluvieux, à un drainage de bonne qualité s'exerçant pendant une période très prolongée.

Ces conditions paraissent bien remplies dans les exemples cités plus haut. Les âges sont très anciens et correspondent à celui de la mise en place de la roche dont va dériver la cuirasse ou bien à la formation de la surface d'érosion sur laquelle va se développer le sol. Depuis le début de l'altération, des climats chauds et humides ont eu le temps d'effectuer les transformations aboutissant à l'enrichissement du matériau en alumine. La position topographique particulière dans laquelle on a observé les cuirasses est également un élément favorable. Les plateaux de dimensions limitées, fortement entaillés par les cours d'eau favorisent l'évacuation des solutions ayant percolé à travers le sol et tout spécialement l'élimination de la silice. MICHEL (1959) à la suite de SABOT (1952) indique qu'en Guinée les surfaces les plus élevées sont les plus riches en alumine. De plus, l'hydro-

morphie temporaire que l'on observe à la surface de certains plateaux est favorable à la réduction et la complexation des composés ferrugineux et à leur élimination provoquant une accumulation relative renforcée de l'alumine.

Le contenu minéral de ces cuirasses est essentiellement gibbsitique. On y voit apparaître un peu de boehmite sur la genèse de laquelle on a encore que peu de données.

## 2.3 - LES SOLS A LA LIMITE DE LA ZONE TROPICALE HUMIDE

Il existe deux manières de quitter la zone tropicale humide. En latitude, en se dirigeant vers le nord ou le sud, on quitte la zone humide pour aller vers des régions de plus en plus sèches. En altitude, on quitte des régions chaudes pour en atteindre d'autres de plus en plus fraîches. Dans les deux cas, les sols changent, mais de manière différente.

### a - Limite de la zone tropicale humide en latitude

En Afrique occidentale et centrale, les variations climatiques coïncident, grosso modo, avec les variations de la latitude par suite de l'arrivée des pluies de mousson à peu près normalement à la côte. En Afrique orientale, et à Madagascar, où l'humidité est apportée par les alizés, la disposition des bandes climatiques est, au contraire, nord-sud et des modifications importantes sont apportées par l'altitude. Mais, les changements apportés au sol seront très semblables. **En Afrique occidentale ou centrale**, on pénètre dans les zones soudanienne ou soudano-sahélienne. La pluie a diminué sensiblement (moins de 1 400 mm), la saison sèche s'est allongée et dépasse généralement six mois. La température a nettement augmenté par suite de la très longue durée de l'insolation, la végétation est modifiée pratiquement partout et les formations primaires ont disparu pour faire place à des savanes variées. Le pays est plat dans l'ensemble et on retrouve, très nettement marquée, la topographie particulière imprimée par les cycles d'érosion successifs. Dans la grande majorité des cas le réseau hydrographique est peu enfoncé. En saison des pluies, l'évacuation des eaux est rendue difficile par la faiblesse des pentes. Les roches-mères sont variées, mais les roches gréseuses, argilo-sableuses ("continental terminal") ou encore les produits de désagrégation de roches grenues (granites divers) dominent très largement. Cet ensemble de caractères : matériaux détritiques assez grossiers, topographie plane, avec réseau hydrographique faiblement encaissé, marquera de manière très nette toute cette zone. **A Madagascar**, les caractéristiques climatiques sont très voisines : pluies concentrées en quelques mois avec une très longue saison sèche ; la couverture végétale naturelle, si elle subsiste en quelques endroits, a disparu le plus souvent pour faire place à la savane ou à la pseudo-steppe. La topographie est généralement assez plane, mais par suite de la disposition monoclinale des couches de sédiments, il se dégage un certain nombre de plateaux à pente douce, terminés par des cuesta de plusieurs dizaines de mètres de hauteur ou davantage. Le réseau hydrographique est beaucoup plus profondément encaissé qu'en Afrique soudanienne. Par ailleurs, si les matériaux détritiques sont prépondérants, bien d'autres existent, comme le basalte, le calcaire.

Dans ces conditions, le développement des profils est beaucoup moins prononcé que dans les zones précédentes. On observe d'une manière générale une réduction de l'épaisseur des horizons et l'horizon C est particulièrement touché. Alors que précédemment, une décomposition chimique intense intéressait une épaisseur considérable de matériau, l'horizon C désormais est réduit très notablement. Les minéraux altérables des roches se fendillent en fragments anguleux et durs, et cessent de s'écraser facilement, comme c'était le cas auparavant. L'horizon B diminue et n'atteint plus qu'un mètre ou deux d'épaisseur, pour des roches-mères telles que gneiss, granites, basaltes, conglomérats, etc.. Par contre, dans ces conditions, les roches sableuses continuent à s'altérer beaucoup plus profondément et l'on a encore des sols épais de plusieurs mètres.

A mesure que la pluie diminue, on voit donc des changements intervenir dans la morphologie. Ils seront accompagnés de changements notables dans les propriétés physiques et chimiques et dans le contenu minéral. A la diminution importante de la pluviométrie, se superpose, par suite de la température plus élevée, une réduction considérable de la quantité d'eau qui percole à travers le sol. Par exemple, le drainage calculé, qui est, pour une pluviométrie de 1,4 m, de 0,60 m à 18° passe à 0,45 m à 28°. Ces chiffres montrent l'importance des pertes par évaporation.



Il en résulte une attaque plus modeste des minéraux dans l'horizon C. Les bases sont complètement entraînées ; le pH de la zone d'altération augmente légèrement dans certains cas et se situe beaucoup plus près de la neutralité. La silice et l'alumine sont individualisées ; mais il n'y a pas assez d'eau pour éliminer tous les produits solubles et en particulier la silice. Celle-ci réagira avec toute l'alumine, pour former de la kaolinite qui est alors le minéral prépondérant. Toutefois un excès de silice, par suite d'une pluviométrie plus faible ou d'un drainage moins complet peut conduire à des minéraux à trois couches tels que l'illite ou la montmorillonite.

Les caractéristiques reconnues aux sols ferrallitiques (grand développement du profil, importance de l'horizon C, altération très poussée des minéraux primaires, abondance de kaolinite et gibbsite, degré de saturation très faible) vont s'estomper graduellement.

- les sols faiblement ferrallitiques peuvent avoir des teneurs modestes en alumine libre (le rapport silice/alumine se rapproche de 2,0), le degré de saturation augmente et atteint des valeurs de 40 à 60 %.

- les sols ferrugineux tropicaux ne renferment plus de gibbsite ; la kaolinite est le minéral argileux dominant, avec parfois des teneurs notables en minéraux 2 : 1. Les hydroxydes de fer, toujours abondants dans les sols ferrallitiques, le sont également dans les sols ferrugineux tropicaux. Ces produits peuvent s'accumuler sur place et ne subir aucun déplacement ; au contraire, ils peuvent migrer seuls, ou en compagnie de l'argile, pour des causes qui restent encore à déterminer avec précision, mais qu'on peut mettre en relation avec la géomorphologie et avec le drainage.

Ces deux ensembles de sols passent graduellement de l'un à l'autre et il est bien difficile parfois de leur fixer des limites précises sur le terrain. Quelques exemples pris dans différentes régions du monde permettent de mieux comprendre les difficultés rencontrées.

La région du Togo et du Dahomey est une de celles où les sols faiblement ferrallitiques ont été mis en évidence grâce aux travaux de FAUCK (1964), WILLAIME et VOLKOFF (1964) qui les ont étudié de près. Ils se développent sous une pluviométrie de 1 300 à 1 400 mm à partir de roches granitiques ou gneissiques ; ils supportent une savane arborée. Les sols présentent un profil de deux à trois mètres avec, à la base, un horizon tacheté. Ils peuvent être indurés, riches en concrétions ou non. Leur rapport silice/alumine est compris entre 1,7 et 2,0 ; l'étude de la fraction argile met en évidence un peu de gibbsite, à côté de la goéthite et de l'hématite, et bien entendu de la kaolinite. En République Centrafricaine, QUANTIN (1965) décrit des sols très comparables sous un régime climatique presque identique et sur des roches-mères analogues. Les sols sont très souvent indurés et correspondent à une surface d'érosion bien déterminée. Ici encore, les rapports silice/alumine sont légèrement inférieurs à 2,0 tandis que le degré de saturation s'élève notablement.

A Madagascar, SEGALEN (1956 b), VIEILLEFON et BOURGEAT (1965) étudient les sols de la partie côtière nord-ouest, entre Ambanja et Ambilobe. La pluviométrie, qui sur l'ensemble de cette côte ne dépassait guère 1 500 mm, s'élève à 1 700-2 000 mm. Une des roches-mères les plus fréquemment observées est ce qu'on appelle la "carapace argilo-sableuse". Alors que partout ailleurs, sous des pluviométries inférieures, on ne trouve dans les sols que de la kaolinite et de la goéthite, on voit ici apparaître la gibbsite en quantités notables. Sur des granites et roches métamorphiques diverses de la côte nord-ouest, certains sols rouges ou rouge-jaune peuvent de même recevoir l'appellation de faiblement ferrallitiques.

Dans certains cas, cependant, le passage par le groupe "faiblement ferrallitique" et les caractéristiques qu'il sous-entend, ne peut guère être saisi, par suite de transition trop brusque. En montagne d'Ambre, au nord de Madagascar, la variation de pluviométrie est très forte sur les versants est et nord et l'on passe très rapidement des sols ferrallitiques typiques, à fortes teneurs en gibbsite, aux sols ferrugineux tropicaux ferrallitiques (1), à kaolinite et goéthite (SEGALEN 1956 à 1957, BOTELHO DA COSTA 1959).

---

(1) Sols où aucun mouvement de fer n'est apparent.

Aux îles Hawaii, les auteurs américains, avec CLINE (1949), SHERMAN et ALEXANDER (1959), décrivent des sols qu'ils dénomment "Low humic latosols" et qui correspondent à des pluviométries de 375 à 750 mm. Ces sols, qui renferment des teneurs importantes en kaolinite et goéthite, peuvent être rapprochés des sols ferrugineux tropicaux fersiallitiques. En Australie, d'après les travaux de COSTIN (1955), FERGUSON (1954), HALLSWORTH (1951), etc., on note que les sols dérivés de basalte, qui s'apparentent aux sols fersiallitiques sous les fortes pluviométries, sont dénommés "kraznozems" ou "red loams" aux basses pluviométries. Ils peuvent, semble-t-il, être comparés aux précédents.

Ces exemples s'appliquent à des sols dérivés de basalte, et dont le drainage est normalement assuré. En Afrique occidentale, sur des matériaux essentiellement sableux épandus sur de vastes plaines, on peut observer des sols fersiallitiques, mais le plus souvent aussi des sols lessivés en fer et en argile.

#### **b - Limite de la zone tropicale humide en altitude**

En altitude, on peut concevoir différentes possibilités pour quitter la zone tropicale humide, soit par une diminution notable de la température tandis que la pluviométrie reste élevée, soit par une diminution importante de la pluviométrie, alors que la température reste encore élevée.

A Madagascar, entre 2 000 et 2 800 m, les sols dérivés de basalte sont encore très riches en gibbsite. La température doit être proche de 12-14°, mais la pluviométrie dépasse encore 2 500 mm. La réunion de ces conditions provoque une forte accumulation de matière organique, tandis que les teneurs en alumine libre restent élevées. Aux Hawaii, à altitude élevée, les sols sont décrits comme "Hydrol humic latosols" par CLINE (1946), TAMURA et al. (1953). Les analyses effectuées par TAMURA et al. ont permis de mettre en évidence, en plus de la gibbsite, de l'allophane qui est placée par JACKSON et SHERMAN (1953) en fin de la série évolutive des minéraux. Mais, il est fort possible également qu'il s'agisse d'une phase de jeunesse précédant l'individualisation de produits cristallins. A très haute altitude, on peut assister, soit à une réduction notable de la pluviométrie, soit au maintien de celle-ci, tandis que la température diminue de façon importante. Les exemples seront choisis parmi les sols de l'Amérique centrale et de l'Amérique du sud, ou de Nouvelle-Guinée. Peu de résultats analytiques sont disponibles dans ces régions mais la réponse au problème posé est donnée par la morphologie. Lorsque la pluviométrie demeure très élevée et que la température s'abaisse notablement, on voit apparaître des sols podzoliques ou des podzols. JENNY (1948) a décrit des podzols dans les parties les plus élevées des Andes, en Colombie. Des sols podzoliques ont été observés au Mexique par l'auteur, sur des matériaux acides à plus de 3 200 m d'altitude, tandis que sur matériaux basiques (andésites, calcaires, ou même schistes), on notait l'existence de sols bruns de type forestier. A très haute altitude, des rankers analogues à ceux d'Europe sont visibles au-dessous de la limite des neiges éternelles. REIJNDERS (1964) décrit dans les montagnes de Nouvelle Guinée, une succession altitudinale de sols s'achevant par des podzols et sols podzoliques.

Par contre, à une altitude plus basse, vers 1 500 à 2 500 m, au Mexique, sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 14 à 16°, et avec une pluviométrie de 5 à 600 mm, les roches basaltiques, andésitiques et calcaires, donnent naissance à des sols à croûte zonée calcaire, assez semblables à ceux décrits dans les régions méditerranéennes. Ces quelques exemples montrent que les sols fersiallitiques à gibbsite peuvent être remplacés par des sols très variés suivant les conditions climatiques qui succèdent à celles de la zone tropicale humide.

### **3 - Essai de Généralisation**

Parvenu à ce stade de cette étude, on peut se demander s'il est possible, à l'aide de ce que l'on sait de la genèse des minéraux alumineux, tant au laboratoire que sur le terrain, de prévoir avec quelque chance de succès le type de minéral présent dans le sol en fonction des conditions de formation du sol. On peut se demander également si la présence d'un minéral particulier est susceptible de caractériser le sol et permettre sa classification.

1 - Certes, SPURR (1954) pense que toute classification des sols qui se base sur les conditions locales, les roches-mères, les minéraux argileux, la végétation, est incorrecte. Il estime que c'est tenir peu compte du passé qui a pu favoriser, dans d'autres conditions générales, la formation de minéraux qui ont subsisté jusqu'à ce jour. Certes, ceci est vrai dans un certain nombre de cas ; en particulier, dans les zones semi-aride ou aride, la présence de sols ferrallitiques ne peut résulter des actions climatiques actuelles. Mais dans la zone humide, il est juste de penser que l'effet de périodes climatiques antérieures plus sèches est rapidement oblitéré et que les caractéristiques des sols, dans cette zone, sont bien le reflet des conditions de climat, végétation, drainage, etc. actuels.

On peut donc se demander s'il existe une corrélation quelconque entre les variables climatiques (pluie, température ou une combinaison de celles-ci) et un constituant minéralogique déterminé (kaolinite, gibbsite, ou une combinaison des deux traduite par le rapport silice/alumine). De telles corrélations ont été présentées par MARTIN et DOYNE (1927) en Sierra Leone, par TANADA (1951) aux Hawaii, par CRAIG et HALAIS (1934), HALAIS (1946) à l'île Maurice, ROBINSON et HOLMES (1924) au sud des U.S.A., ainsi que par l'auteur (1957). On observait généralement que le rapport était d'autant plus faible (c'est-à-dire qu'il y avait d'autant plus d'alumine libérée) que la pluviométrie était plus forte. Ceci paraissait rationnel car l'hydrolyse des minéraux devait être d'autant plus poussée que l'eau disponible était plus élevée. Cependant MOHR et VAN BAREN (1954) rappellent que GLANGEAUD (1941) avait présenté une corrélation inverse pour la Côte d'Ivoire. Par ailleurs, si dans certains pays comme Madagascar la présence d'alumine est la règle dans les sols de la zone humide, il n'en est pas de même dans beaucoup d'autres comme ceux bordant le Golfe de Guinée depuis la Guinée jusqu'au Congo. La kaolinite a paru alors être le seul minéral caractéristique, si bien que SYS (1961) a pu donner aux sols des régions humides du Congo le nom de kaolisols. Cette différence peut maintenant se comprendre mieux.

Le premier groupe d'auteurs avait travaillé sur des sols dérivés de roches basiques et souvent sur des accumulations volcaniques ; on a vu que ces conditions étaient les plus favorables à une hydrolyse rapide et à une bonne élimination des bases et de la silice. Le second groupe, par contre, examine des sols dérivés de roches acides, dans des climats très humides (et surtout à très longue saison des pluies) et sur de très vieilles surfaces. Or, il a été vu précédemment que ces conditions sont défavorables à une élimination totale des produits de l'hydrolyse et favorables au maintien de la kaolinite. Il n'y a donc pas d'antinomie entre les deux ensembles de résultats.

La prévision ne deviendra possible, avec beaucoup de prudence d'ailleurs, que lorsque l'on sera assuré que les conditions du drainage ne contrarient pas l'élimination de la silice. On peut alors s'appuyer sur un tableau analogue à celui présenté en 1957 (1).

La mise en liberté d'alumine sous forme d'hydroxyde peut être limitée, dans presque tous les cas, à 1 m de pluviométrie. Au-dessous de cette valeur l'individualisation ne se produit plus. Lorsque la température s'abaisse, c'est-à-dire lorsque l'altitude augmente, la mise en liberté d'hydroxydes d'aluminium pourra se poursuivre plus ou moins haut, à condition que la réduction de l'hydrolyse due à la diminution de la température soit compensée par une augmentation de la pluviométrie. Par exemple, à Mexico, à 2 200 m d'altitude, sous une température moyenne de 16°, mais avec 0,6 m de pluviométrie, il n'y a pas sur roche basique de sol ferrallitique, mais des sols à croûte calcaire. Par contre, à Madagascar, à 2 500 m d'altitude, avec 12° de température et une pluviométrie proche de 3 m, les teneurs en gibbsite des sols sont encore importantes.

Lorsque la température est élevée, la perte par évaporation de l'eau des précipitations est forte, ce qui entraîne une réduction de l'hydrolyse des minéraux des roches. On ne connaît pas de zone où la pluviométrie et la température soient, ensemble, très élevées. Cette dernière ne dépasse guère 28°. La réduction de la quantité d'eau du sol, favorise la concentration des solutions en silice et une élévation du pH. Il n'y aura plus de gibbsite, mais de la kaolinite, et des minéraux argileux à trois couches. Aux températures intermédiaires (voisines de 20°), la genèse de la gibbsite devient importante. La perte d'eau par évaporation est diminuée et compense l'abaissement de la

---

(1) cf. SEGALIN (1957), p. 127

température. Entre 1,2 et 1,8 m de pluviométrie, les teneurs en alumine sont particulièrement élevées au Cameroun et à Madagascar. Lorsque la pluviométrie est très forte, le sol reste humide, l'élimination de la silice se fait mal et la kaolinite devient prépondérante. L'on aboutit alors aux sols ferrallitiques fortement désaturés du Gabon, de la basse Côte d'Ivoire, de Guyane, etc..

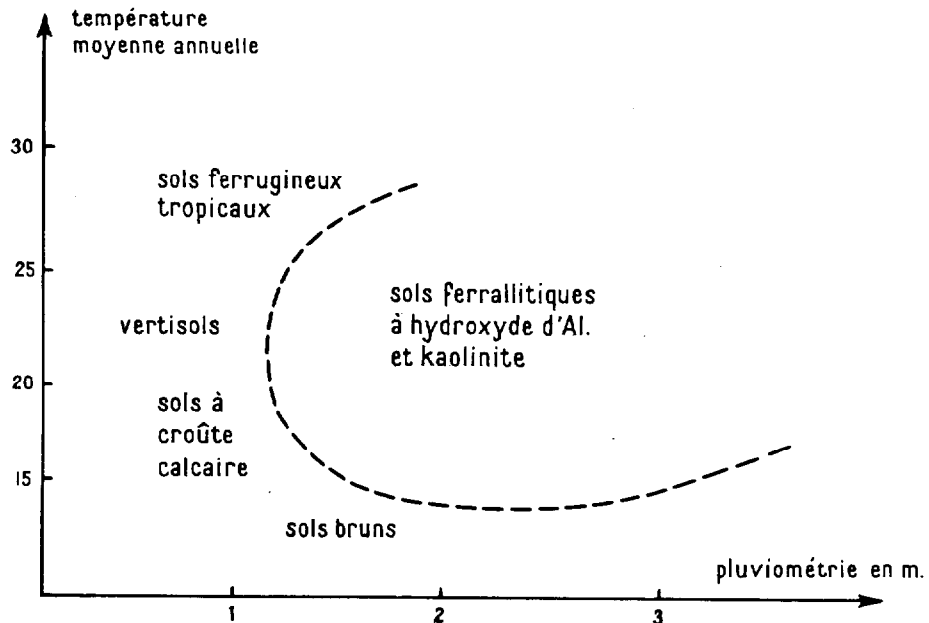


Fig.11. Répartition des sols dérivés de roches volcaniques basiques en fonction de la pluie et de la température.

Lorsqu'on porte sur un graphique, où figurent pluie et température, les sols observés, on constate que les sols ferrallitiques de la zone tropicale humide se regroupent dans une zone assez bien délimitée. A l'intérieur de cette zone on a, **en même temps**, kaolinite et hydroxyde d'aluminium dans des proportions qui demeurent liées à la qualité du drainage. Lorsqu'on se rapproche de la limite des sols ferrallitiques avec les autres sols, la kaolinite subsiste seule puis s'associe à d'autres minéraux argileux lorsqu'on quitte le domaine propre de la ferrallitisation.

2 - Les résultats obtenus précédemment montrent que la présence d'hydroxydes d'aluminium est toujours associée aux sols ferrallitiques. Toutefois, un drainage contrarié, un excès de pluviométrie, entraînent la genèse préférentielle de la kaolinite. L'absence de gibbsite ne permet donc pas de conclure avec certitude. L'on est donc obligé de s'adresser à d'autres critères. Ceux-ci peuvent donc être soit physico-chimiques (pH, degré de saturation) ou morphologiques (développement du profil). C'est en fin de compte vers ces derniers que l'on se tournera.

Un développement approprié du profil avec la présence de tous ses horizons, un pH acide, à très acide, un degré de saturation faible à très faible, joints à un des minéraux kaolinitiques et/ou de la gibbsite permet d'identifier un sol ferrallitique.

L'absence de gibbsite, la présence de kaolinite, joints à un pH faiblement acide à neutre, un degré de saturation élevé, éloignent les sols de la sous-classe ferrallitique. La morphologie permettra alors de fixer la position taxonomique du sol.

## 4 - Conclusions

Ce rapide survol des sols de la zone intertropicale humide, envisagé sous l'angle des minéraux alumineux (hydroxydes ou silicates) montre que le problème essentiel est réglé par la réaction d'équilibre :



Les facteurs susceptibles d'agir sur cet équilibre sont :

a - le couple **pluie-température**, qui règle l'hydrolyse des minéraux. Il existe une vaste zone de "pluie chaude" favorable à la genèse de la gibbsite. Si la pluie diminue notablement, tout en restant chaude, la kaolinite devient seule présente et s'adjoint bientôt d'autres minéraux (illite ou montmorillonite). Si la pluie reste élevée mais devient fraîche, l'on assiste à la diminution et la disparition de la gibbsite.

b - la **nature** de la roche-mère. Les roches dites basiques, facilement altérables, et moins fournies en silice, sont plus favorables à la genèse de la gibbsite. Les roches acides, aux minéraux très lentement altérables (dont le quartz) sont susceptibles de fournir régulièrement de la silice dissoute au milieu, ce qui conduit plus facilement à des sols plus riches en kaolinite.

c - le régulateur de la réaction le plus important est la qualité du **drainage**. Celui-ci est souvent médiocrement assuré dans les zones à pluviométrie excessive. Certaines roches-mères basiques, par leur mode de gisement, par leur granulométrie, sont facilement traversées par l'eau et s'altèrent rapidement en gibbsite. Mais le facteur le plus important paraît être la géomorphologie. Les grandes surfaces d'aplanissement, où le réseau hydrographique est faiblement implanté, sont favorables à la kaolinite. Par contre, ces mêmes surfaces, lorsqu'elles sont soulevées ou bien lorsque le réseau hydrographique est fortement enfoncé, sont au contraire favorables à la gibbsite. Enfin les régions montagneuses sont, par leurs pentes fortes, plus favorables à la gibbsite qu'à la kaolinite.

d - la végétation ne paraît avoir qu'une influence très faible sur la réaction d'équilibre envisagée.

Par conséquent, les sols de la zone tropicale humide, dans lesquels se produit un gros départ de bases et de silice, ne peuvent être qu'imparfaitement caractérisés par leurs minéraux alumineux. Certes, les sols non ferrallitiques ne contiennent jamais d'hydroxyde d'aluminium bien individualisé. Le départ de silice est insuffisant pour que l'on dépasse le stade kaolinite et l'on peut avoir d'autres silicates d'alumine à trois couches. A ce caractère sont associés bien d'autres dans les domaines physico-chimiques (pH, degré de saturation) et de la morphologie.

Parmi les sols ferrallitiques, la présence en quantité nettement dosable d'alumine libre (déterminations conjointes du rapport silice-alumine, de la courbe d'analyse thermique différentielle, et surtout du spectre de rayons X) est suffisant pour placer les sols dans la sous-classe ferrallitique. Mais l'élimination de la silice est trop facilement contrariée pour que l'appréciation de la teneur en alumine seule puisse intervenir. Des sols contenant uniquement de la kaolinite, par suite de pluviométrie excessive, de drainage imparfait, peuvent encore être classés dans les sols ferrallitiques; il faut alors tenir compte d'autres caractéristiques comme le pH, le degré de saturation et la morphologie.

*REMERCIEMENTS - L'auteur tient à remercier bien vivement toutes les personnes qui ont lu le manuscrit et ont bien voulu apporter leurs observations et leurs critiques et discuter avec lui des idées présentées dans cet article. Ces remerciements s'adressent tout spécialement à MM. AUBERT, COMBEAU, FOURNIER et MAIGNIEN de l'O.R.S.T.O.M., MM. FRIPIAT, Professeur et HERBILLON, Assistant à l'Université de Louvain.*

## 5 - Bibliographie

- ANONYME - Annuaire hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. (Publié avec le concours de l'E.D.F. et de la S.H.F.), 1959, 2 vol. 511 et 119 p.
- AUBERT (G.) - Observations sur la dégradation des sols et la formation de cuirasse latéritique dans le nord-ouest du Dahomey. *C.R. 4e Conf. Intern. Sc. Sol* 1950, 3, 127-8.
- AUBERT (G.) - Les sols latéritiques. *C.R. Ve Conférence Intern. Sc. Sol*, 1954, 103-108.
- AUBERT (G.) - Soils with ferruginous or ferrallitic crusts of tropical regions. *Soil Sc.*, 1963, 95, 235-242.
- AUBREVILLE (A.) - Erosion et bovalisation en Afrique Noire française. *Agron. trop.*, 1947, 7-8, 339-357.
- AUBREVILLE (A.) - Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale. *Soc. Ed. Geog. Marit. Colon. Paris*, 1949, 357 p.
- AUBREVILLE (A.) - *Flore forestière Soudano-guinéenne*. 1950.
- BACHELIER (G.) - Etude pédologique des sols de Yaoundé (Contribution à l'étude de la pédogenèse des sols ferrallitiques). *Agron. trop.*, 1959, 14, 3, 279-305.
- BACHELIER (G.), LAPLANTE (A.) - Sur l'origine et la formation de cuirasses dites latéritiques dans l'Adamaoua. *C.R. Ac. Sc.*, 1953, 237, 1277-1279.
- BACHELIER (G.), SEGALEN (P.) - Notice de la carte pédologique au 1/50 000 de Fombot. Ronéo I.R.CAM. Yaoundé, 1956, 43 p.
- BACHELIER (G.), CURIS (M.), MARTIN (D.), SEGALEN (P.) - Notice de la carte pédologique au 1/50 000 Mbouda-Bamendjida, 1957, 52 p. Ronéo I.R.CAM. Yaoundé.
- BARBIER (R.) - Sur l'âge des latérites. *C.R. Ac. Sc.*, 1960, 250, 7, 1306-8.
- BEGUE (L.) - *Contribution à l'étude de la végétation forestière de la Haute Côte d'Ivoire*, 1937.
- BESAIRIE (H.) - Notice sur la carte géologique au 1/200 000 de Bealanana. Service des Mines et de la Géologie. Tananarive, Madagascar, 1933.
- BESAIRIE (H.) - Considérations sur les gîtes de bauxite et les pénéplaines à Madagascar. Rapp. annuel. Serv. Géol. Madagascar, Tananarive, 1957, 83-87.
- BIROT (P.) - Le cycle d'érosion sous les différents climats. *Rio de Janeiro, Centre de pesquisas de geografia do Brazil*, 1960, 137 p.
- BIROT (P.) - *Géographie physique générale de la zone intertropicale*. C.D.U. Paris, 1965, 287 p.
- BONNET (J.A.) - The nature of laterization at Porto Rico. *Soil Sc.*, 1939, 48, 25-40.
- BOTELHO DA COSTA (J.) - Ferrallitic tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils. Definitions adopted in the Classification of the soils of Angola. *3e Conf. Interafric. des Sols*, Dalaba, 1959, 1, 317-319.
- BRUNT (M.), HAWKINS (D.) - Soil and land use survey in west Cameroons. The Bamenda area. (communication privée).
- CAHEN (L.), LEPERSONNE (J.) - Notes sur la géomorphologie du Congo Occidental. *Ann. Mus. Congo belge, Tervuren, Belgique. Sc. Géol.*, 1948, 1, 7-95.
- CASTAGNOL (E.M.), PHAN GIA TU - Etude des principaux types de latérite d'Indochine. *Bull. Econ. Indochine*, 1940, 2, 35.
- CHATELIN (Y.) - Examen des caractères physico-chimiques principaux de quelques sols typiques du Gabon. Rapport ORSTOM Libreville, 1964, 19 p. (à paraître dans les *Cahiers de Pédologie*).

- CLINE (M.) in KELLOGG (C.E.) - Preliminary suggestion for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. *Commonwealth Bur. Soil Sc. Tech. Comm.* 46, 1946, 76-85.
- CORNEVIN (R.) - *Histoire des peuples de l'Afrique Noire*. Berger Levrault, Paris, 1963, 715 p.
- CORNEVIN (R. et M.) - *Histoire de l'Afrique des origines à nos jours*. Payot, Paris, 1964, 423 p.
- COSTIN (A.B.) - A note on basalt soils in Britain and Australia. *J. Soil Sci.*, 1955, 6, 268-9.
- CRAIG (N.), HALAIS (P.) - The influence of maturity and rainfall on the properties of lateritic soils in Mauritius. *Emp. J. Exp. Agric.*, 1934, 2, 349-58.
- D'HOORE (J.) - L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. *Publ. I.N.E.A.C.*; 1954, 62, 132 p.
- D'HOORE (J.) - Clay mineral and gibbsite crystals as clues to the mode of formation of ancient sesquioxides accumulation zones. *C.R. 5e Conf. Sols*, V, 7.
- D'HOORE (J.) - Le facteur humain et l'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. *C.R. 2e Conf. Interatic. Sols*, 1954, 12, 15 p.
- D'HOORE (J.) - Comparaisons pédologiques entre les continents sud américain et africain (zones intertropicales). *Sols Africains*, 1958, 4, 3, 1-19.
- DIXEY (F.) - Erosion surfaces in Africa. *Trans. Geol. Soc. South Africa*, 1955, 58, 265-280 et E.D.F.
- DIXEY (F.) - Geology and geomorphology of Madagascar. A comparison with East Africa. *Anat. J. Geol. Soc.* 1960, CXVI, 225-268.
- DIXEY (F.) - Observations sur les surfaces d'érosion à Madagascar. *C.R. Ac. Sc.*, 1958, 247, 944-7.
- DRESCH (J.) - Les pénéplaines africaines. *Ann. Geog.*, 1947, 56, 125-137.
- DRESCH (J.) - Les surfaces d'aplanissement et les reliefs résiduels sur le socle cristallin en Afrique tropicale. *XVIII° Cong. Intern. Geog. Rio de Janeiro*, Com. n° 29, 1956.
- DUCHAUFOUR (Ph.) - *Précis de pédologie*. Masson, Paris, 1960, 438 p.
- EMBERGER (A.) - Recherche de bauxites dans l'Ankaizinana. Rapport annuel Serv. géol. Madagascar, Tananarive, 1957, 49-64.
- EMBERGER (L.) - Sur une formule climatique et ses applications en botanique. *La météorologie*, 1932.
- ERHART (H.) - *Traité de pédologie*. Strasbourg, 1933, 2 t.
- FAUCK (R.) - Les sols faiblement ferrallitiques d'Afrique. *C.R. 8° Conf. Intern. Sc. Sol* (Bucarest, V, 407-8, résumé).
- FERGUSON (J.A.) - Transformation of clay minerals in black earths and red loams of basaltic origin. *Austr. J. Agric. Res.*, 1954, 98-107.
- FRIPIAT (J.J.), GASTUCHE (M.C.), COUVREUR (J.) - *C.R. 5e Conf. Intern. Sc. Sol* (Léopoldville) 1954. Nature de la fraction argileuse des sols du Congo belge et du Ruanda Urundi. Les argiles du Haut Ifuri, II, 25, 9 p. Les argiles de la vallée de la Ruzizi ; les argiles de la vallée de la Mosso.
- FRIPIAT (J.J.), GASTUCHE (M.C.), FOCAN (A.), COUVREUR (J.) - Les argiles des sols de l'Uélé. 4, 308-315. *C.R. 5° Conf. Intern. Sc. Sol* (Léopoldville) 1954.
- FRIPIAT (J.J.) - Les argiles des sols tropicaux. *Silic. Industr.*, 1958, 11 p.
- GAUSSEN (H.) - L'indice xérothermique. *Bull. Assoc. Géog. Franc.*, 1952, 10-16.
- GAUSSEN (R.) - Travaux de laboratoire forestier de Toulouse, en collaboration avec le C.N.R.S. (collection dirigée par M. le Professeur GAUSSEN).

- GAUSSEN (H.), LEGRIS (P.) - Délimitation des zones tropicales humides. *Bull. Soc. Hellen. Géographie*, Athènes, 1963, IV, 65-79.
- GIGNOUX (M.) - *Géologie stratigraphique*. Masson, Paris, 1943, 665 p., (cf. p. 254).
- GLANGEAUD (J.) - Etude statistique de l'action du bioclimat sur les caractères minéralogiques des sols de la Côte d'Ivoire. *C.R. Ac. Sc.*, 1941, 212, 862-864.
- GUIRAUDIE (Ch.) - Rapports de tournée pour le levé géologique de la feuille Ngaoundéré (ouest). Cameroun. 1949 à 1953. Ronéotypé. Dir. Serv. Mines Géol. du Cameroun, Yaoundé.
- HALAIS (P.) - Données essentielles sur les sols de l'île Maurice. *Rev. Agric. Ile Maurice*, 1946, 25, 192-7.
- HALLSWORTH (E.G.) - An interpretation of the soil formation found in the Richmond-Tweed region of New South Wales. *Austr. J. Agric. Res.*, 1951, 2, 411-428.
- HARDY (F.), RODRIGUES (G.) - Soil genesis from andesite in Granada G.W.I., *Soil Sc.*, 1939, 48, 361-384.
- HARDY (F.), FOLLETT-SMITH (R.R.) - Studies in tropical soils. *J. Agric. Sc.*, 1931, 21, 739-761.
- HARROY (J.P.) - *L'Afrique, terre qui meurt*. Lechevalier, Paris, 1944, 557 p.
- HENIN (S.), AUBERT (G.) - Relation entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C.R. Ac. Sc.*, 1945, 220, 330.
- HERVIEU (J.) - Profils types de sols malgaches. Pub. ronéo, I.R.S.M. Tananarive, 1961, 106 p.
- HUMBERT (H.) - La destruction d'une flore insulaire par le feu. *Mem. Acad. Malg.* (Tananarive), 1927, V, 1-80.
- HURAUULT (J.) - Recherches sur les inselbergs granitiques nus en Guyane française. *Rev. Géomorph. Dynam.* 1963, 7-8-9, 49-61.
- JENNY (H.) - Great soil groups in the equatorial regions of Columbia, South America. *Soil Sc.*, 1948, 66, 1, 5-28.
- JACKSON (M.L.), SHERMAN (G.D.) - Chemical weathering of minerals in soils. *Adv. Agron.*, 1953, V, 221-319.
- JONGEN (P.) - Genèse des sols de pédiplaine en Ubangui (Congo belge). *Pédologie* (Gand), 1957, VII, 133-144.
- JONGEN (P.) - Relations entre faits géomorphologiques et pédogenèse des sols tropicaux (Congo belge). *C.R. VII Conf. Intern. Sc. Sol*, 1960, IV, 335-346.
- KALPAGE (F.S.C.P.), MITCHELL (B.D.), MITCHELL (W.A.) - The mineralogy of some Ceylon Soils. *Clay Min. Bull.*, 1963, 30, 5, 309-318.
- KEAY (W.) - *Isobertinia woodlands in Nigeria and their flora*. Lejeunia, 1952.
- KELLOGG (C.E.), DAVOL (F.O.) - An exploratory survey of the soils of the Belgian Congo. *Publ. I.N.E.A.C.* Bruxelles, 1949, 46, 73 p.
- KING (L.C.) - The study of the worlds plainlands. A new approach in geomorphology. *Quatern. J. Geol. Soc.*, 1950, 106, 101-131.
- KING (L.C.) - *Morphology of the earth*. Oliver and Boyd, London, 1962, 699 p.
- LACROIX (A.) - Les latérites de Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Nilles Archiv. Mus. Hist. Nat.*, 1913, 5, 5, 255-358.
- LANG (R.) - Versuch einer exakter klassifikation der Böden in klimatischen und geologischen Hinsicht. *Int. Mitt. Bodenk.*, 1915, 312-346.
- LAPLANTE (A.) - Les sols rouges latéritiques formés sur les basaltes anciens au Cameroun. *C.R. 5e Conf. intern. Sc. Sol*, 1954, vol. IV, 140-3.
- LAPLANTE (A.), BACHELIER (G.) - Les principaux sols formés sur les roches volcaniques au Cameroun ; observations sur leur fertilité et leur exploitation agricole. *C.R. Ile confer. inter. sols*, 1952, 441, 452.



- LE BOURDIEC (P.) - Contribution à l'étude géomorphologique du bassin sédimentaire et des régions littorales de Côte d'Ivoire. *Etudes Eburnéennes*, 1958, VII, 7-96.
- LETOUZEY (R.) - Phytogéographie camerounaise in *Atlas du Cameroun*, 1958, I.R.CAM Yaoundé, 5 p., 1 carte au 1/2 000 000.
- LEVEQUE (A.) - Les sols développés sur le bouclier antécambrien guyanais. Publ. ronéo, ORSTOM, 1963, 244 p.
- MABBUTT (J.) - A study of granite relief from South Africa. *Geolog. Mag.*, 1952, 89, 2, 87-96.
- MAIGNIEN (R.) - Le cuirassement des sols en Guinée. *Mem. Carte géol. Als. Lor.*, 1958, 16, 204 p.
- MAIGNIEN (R.) - Formation de cuirasses de plateaux, région de Labé (Guinée). *C.R. 5 Confer. Intern. Sc. Sol*, 1954, IV, 13-18.
- MANGENOT (G.) - Etude sur les forêts, les plaines et les plateaux de la Côte d'Ivoire. *Etudes Eburnéennes*, 1955, 4, 5-61.
- MANGENOT (G.) - Sur les forêts de Côte d'Ivoire. *Bull. Soc. Bot.*, 1950, 97, 156.
- MANGENOT (G.) - Essai sur les forêts denses de la Côte d'Ivoire. *Bull. Soc. Bot.*, 1950, 97-159.
- MANGENOT (G.) - Sur une formule permettant de caractériser numériquement le climat des régions intertropicales dans ses rapports avec la végétation. *Rev. Génér. Bot.*, 1951, 58, 353-372.
- MANGENOT (G.), MIEGE (J.), AUBERT (G.) - Les éléments floristiques de la Basse Côte d'Ivoire et leur répartition. *C.R. Som. Soc. Biogéog.*, 1948, 25, 30-34.
- MARTIN (F.J.), DOYNE (H.C.) - Laterite and lateritic soils in Sierra Leone. *J. Agric. Sc.*, 1927, 17, 530-546.
- MARTIN (D.), SEGALIN (P.) - Notice de la carte pédologique de Fossang. Ronéo I.R.CAM. Yaoundé, 1957, 49 p.
- MARTONNE (E. de) - Essai de classification des grands types de climats. *Ass. Fr. Avanc. Sc.*, 1937.
- MARTONNE (E. de) - Nouvelle Carte mondiale de l'aridité. *Ann. Geogr.*, 1942, 241-250.
- MICHEL (P.) - L'évolution géomorphologique des bassins du Sénégal et de la Haute Gambie. Ses rapports avec la prospection minière. *Rev. Géomorph. Dynam.*, 1959, 5-12, 117-143.
- MIEGE (J.) - Relation entre savane et forêt en Basse Côte d'Ivoire. *Comm. Cong. Afric. Ouest*, Abidjan, 1953.
- MIEGE (J.) - Savanes et forêts claires de la Côte d'Ivoire. *Etudes Eburnéennes*, 1955, 4, 62-81.
- MOHR (E.C.J.), VAN BAREN (F.A.) - *Tropical soils*. Interscience publishers, London - New York, 1954, 498 p.
- MOORMAN (F.R.), PANABOOKE (C.R.) - Soils of Ceylon. *Trop. Agriculturist.*, 1961, 117, 1, 1-38.
- MORTELMANS (G.) - Vue d'ensemble sur le quaternaire du Bassin du Congo. *Act. Cong. Internat. Sc. Prehist. Protohist.*, Zurich, 1950.
- PAYNE (W.J.A.) - The origin of domestic cattle in Africa. *Emp. J. Exp. Agric.*, 1964, 126, XXXII, 97-113.
- PEGUY (C.P.) - *Précis de climatologie*. Masson, Paris, 1961, 347 p.
- PERRIER DE LA BATHIE (H.) - La végétation malgache. *Ann. Mus. Col. Marseille*, 1921, 29, 1-268.
- PERRIER DE LA BATHIE (H.) - Les prairies de Madagascar. *Rev. Bot. appl.*, 1928, 8, nos 84 à 86.
- PIANET (A.) - Rapport sur les bauxites de l'Adamaoua. Dir. Mines Géol. Cameroun, Yaoundé, 1959, 109 p.

- PRUNET (J.) - Hydrogéologie et captage des eaux souterraines en Côte d'Ivoire. *Bull. Dir. Mines Géol. A.O.F.*, 1949, 2, p. 70.
- QUANTIN (P.) - *Les sols de la République Centre Africaine*. Public. O.R.S.T.O.M. (sous presse) 1965.
- REIJNDERS (J.J.) - Une séquence de sols dans les régions tropicales depuis le niveau de la mer jusqu'à la limite des neiges. *C.R. (résumés) 8 Confer. Intern. Sc. Sol* (Bucarest), 1964, V, 465-6.
- REIJNDERS (J.J.) - A pedological study of soil genesis in the tropics from sea level to eternal snow (Stas mountains, Central, New Guinea), *Nova Guinea* (Leiden, Hollande), 1964, 6, 159 p.
- RIQUIER (J.) - Latérite et latéritisation à Madagascar. Considérations sur les tampoketsa d'Ankazobe et de la Menazomby. Rapp. annuel Serv. Geol. Madagascar, Tananarive, 1957, 89-95.
- ROBERTY (G.) - *Carte de la végétation de l'Afrique Tropicale Occidentale*. Publ. O.R.S.T.O.M., 1964.
- ROUGERIE (G.) - *Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière*. I.F.A.N., Dakar, 1960, n° 58, 542 p.
- ROBINSON (W.A.), HOLMES (R.S.) - The chemical composition of soil colloids. *U.S.D.A., Bull.* 1311, 1924.
- RUHE (V.) - Erosion surfaces of Central African High Plateaux. *Publ. I.N.E.A.C.*, 1954, 59, 1-40.
- SABOT (J.) - Latérites. *Comm. Conf. Intern. Géol. Alger*, 1952, XXI, 181-192.
- SCHNELL (R.) *La forêt dense. Introduction à l'étude botanique de la région forestière de l'Afrique occidentale*. Le Chevalier, Paris, 1950, 330 p.
- SEGALEN (P.) - Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Mém. Inst. Rech. Sc. Madag.* 1957, D, VIII, 1-181.
- SEGALEN (P.) - a - Notice sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200 000. Feuilles de Diego-Suarez, Marovoay et Mitsinjo. *Mém. Inst. Rech. Sc. Madag.*, 1956, D, VII, 93-315.
- SEGALEN (P.) - b - Notice sur la carte pédologique au 1/50 000 des plaines d'Ambilobé. *Mém. Inst. Sci. Madag.*, 1956, D, VII, 317-374.
- SEGALEN (P.), TERCINIER (G.) - Notice sur la carte pédologique de l'Ankaizinana. *Mém. Inst. Rech. Sc. Mad.*, 1951, D, III, 181-283.
- SHERMAN (G.D.), ALEXANDER (L.T.) - Characteristics and genesis of low humic latosols. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 1959, 23, 2, 168-170.
- SILLANS (R.) *Les savanes de l'Afrique centrale française. Essai sur la physionomie, la structure et le dynamisme des formations végétales ligneuses de l'Oubangui-Chari*. Le Chevalier, Paris, 1958, 423 p.
- SPURR (A.M.M.) - A basis of classification of the soils of areas of composite topography in Central Africa with special reference to the soils of the southern highlands of Tanganyika. *C.R. 2d Conf. Interafr. Soils*, 1954, 1, 175-192.
- STEPHENS (L.G.) - *A manual of Australian soils*. C.S.I.R.O., Melbourne, 1953, 48 p.
- SYS (C.) - Principles of soil classification in the Belgian Congo. *7th Intern. Cong. Soil Sc.*, Madison, 1950, IV, 112-118.
- SYS (C.) et al. - La cartographie des sols au Congo. Ses principes et ses méthodes. *Publ. I.N.E.A.C.*, 1961, 66, 149 p.
- TAMURA (T.), JACKSON (M.L.), SHERMAN (G.D.) - Mineral content of low humic, humic and hydrol humic latosols of Hawaii. *Proc. Soil Sc. Soc. Amer.*, 17-, 343-346, 1953.
- TAMURA (T.), JACKSON (M.L.), SHERMAN (G.D.) - Mineral content of a latosolic brown forest soil and a ferruginous latosol of Hawaii. *Proc. Soil Sc. Soc. Amer.*, 1955, 19, 435-9.

- TANADA (T.) - Certain properties of the inorganic colloidal fractions of hawaiian soils. *J. Soil Sci.*, 1951, 2, 83-96.
- TRICART (J.) - Tentative de corrélation des périodes pluviales africaines et des périodes glaciaires. *C.R. Som. Soc. Geol. Fr.*, 1956, 9, 164-166.
- TRICART (J.) - Quelques éléments de l'évolution géomorphologique de l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *Rech. Afric.*, 1962, 1, 30-39.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.) - *Le modelé des régions chaudes. Forêts et savanes.* S.E.D.E.S., Paris, 1965, 322 p.
- TROCHAIN (J.L.) - *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal.* Larose, Paris, 1940, 433 p.
- TROCHAIN (J.L.) - Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale. *Bull. Inst. Cent. Afric.*, Brazzaville, 1957, 13-14, 53-93.
- TURC (L.) - *Le bilan de l'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement.* Publ. I.N.R.A., Paris, 1955, 252 p.
- VAN KERSEN (J.) - Bauxite deposits in Suriname and Demerara (British Guiana). *Leid. Geol. Meded.*, 1956, 21, 247-375.
- VAN DER MERWE (C.R.) - Les minéraux argileux des groupes de sols subtropicaux de l'Union de l'Afrique du Sud. *Sols Africains*, 1958, IV, 2, 105-121.
- VAN DER MERWE (C.R.) - Soil groups and subgroups of South Africa. *Un. South Afr. Dept Agric., For. Bull.*, 1940, 231, 316 p.
- VAN DER MERWE (C.R.), HEYSTECK (H.) - Clay minerals of South african soil groups. I. Laterites and related soils. *Soil Sc.*, 1952, 74, 383-401.
- VAN DER MERWE (C.R.), WEBER (H.W.) - The clay minerals of south african soils from granite under different climatic conditions. *S. Afric. J. Agric. Sc.*, 1963, 6, 411-454.
- VIEILLEFON (J.) - *Notice sur la carte de reconnaissance au 1/50 000 des sols de l'île Ste Marie.* 1961, 50 p. Publ. Inst. Rech. Sc. Madagascar.
- VIEILLEFON (J.), BOURGEAT (F.) - *Notice sur la carte de reconnaissance au 1/200 000 de l'Ambilobe.* Publ. O.R.S.T.O.M. (sous presse) 1965.
- WILLAIME (P.), VOLKOFF (B.) - Notice de la carte des sols du Dahomey au 1/1 000 000. Rapport ronéo O.R.S.T.O.M., 1964, 67 p.