

Contribution à l'étude de la LOCALISATION DES DIFFÉRENTES FORMES DE COMPOSÉS DU FER AU SEIN DE QUELQUES SOLS DU CAMEROUN

Lj. NALOVIC* et F.X. HUMBEL**

RÉSUMÉ

L'étude des formes de composés du fer par la méthode préconisée par P. Ségalen a été faite sur différentes fractions granulométriques de quelques sols typiques du Cameroun. Les résultats obtenus nous permettent de mettre en relation les caractères suivants :

- *la couleur rouge,*
- *la forte teneur relative en formes amorphes de composés du fer,*
- *les fortes teneurs en éléments traces, métaux lourds,*
- *l'abondance des pseudo-particules,*
- *la faible densité apparente.*

La fraction qui présente les variations en teneurs de composés du fer les plus significatives est celle des sables (50/2000 μ). C'est ainsi que le rapport fer de forme amorphe/fer total de cette fraction paraît renseigner sur l'héritage de la roche-mère et sur le comportement des composés du fer dans la nature.

Enfin, cette étude nous a permis de mettre en évidence l'importance des facteurs pédogénétiques pour la formation des formes hydratées de composés du fer.

ABSTRACT

A study of iron compounds forms have been made following the method, described by P. Segalen, on different granulometric fractions of few typical soils of Cameroons. The results obtained permit to relate the following soil characters :

- *the red colour,*
- *the high relative content of amorphous forms of iron compounds,*

* Centre ORSTOM de Yaoundé BP 193, Cameroun.

** Centre ORSTOM de Yaoundé BP 193, Cameroun.

- the high content of trace-elements (heavy metals),
- the abundance of pseudo-particles,
- the low apparent density.

The soil fraction with most significant iron compounds content variation is the sand fraction (50-2 000 μ). The amorphous iron/total iron ratio of that fraction seems to be informative on the parent material heritage and on the behaviour of iron compounds in the nature.

Finally, the importance of the pedogenetic factors for the genesis of iron compounds hydrated forms have been set out in this study.

PLAN

INTRODUCTION

1. MÉTHODES D'ANALYSE
2. LES SOLS ÉTUDIÉS
3. LES FORMES DE COMPOSÉS DU FER
 - 3.1. Dans deux sols rouges ferrallitiques
 - 3.2. Dans un sol ocre et un sol jaune ferrallitiques
 - 3.3. Dans un sol ferrugineux et deux sols rouges tropicaux
 - 3.4. Dans un vertisol
 - 3.5. Dans deux sols bruns eutrophes
 - 3.6. Structure et évolution des pseudo-sables
4. DISCUSSION
5. CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Les connaissances sur la minéralogie, la cristallographie et la géochimie de la fraction fine des sols ont fait de grands progrès ces dernières années grâce à la vulgarisation des méthodes physico-chimiques modernes (diffraction des rayons X, microscopie électronique, Analyse Thermique Différentielle, etc.).

Cependant, il existe encore bien des domaines importants dans lesquels les travaux, même récents, aboutissent à des conclusions contradictoires. Parmi ces domaines insuffisamment explorés, celui de la connaissance des différentes formes de composés du fer, notamment des formes amorphes*, présente

* Le terme de « fer amorphe » a été conservé dans ce rapport pour désigner les formes du fer facilement extractibles par le traitement préconisé par SEGALÉN. Il correspond grossièrement aux teneurs en hydroxydes hydratés du fer car l'analyse thermique différentielle révèle chaque fois leur présence dans ces sols dérivés de roches non sédimentaires.

Ce traitement est en effet capable d'extraire aussi des oxydes ou hydroxydes de fer mal cristallisés (sols sur continental terminal, FAUCK, 1971).

un intérêt particulier dans les sols tropicaux du fait de leur abondance : dans les régions basaltiques et en général sur les roches riches en fer et sous climat chaud et humide se forment des sols dont la teneur en fer de forme amorphe atteint jusqu'à 15 % du sol total et 90 % du fer total.

Cette forme de fer plus ou moins hydratée, non cristallisée, à laquelle on attribue le nom de Stilpnosiderite et qui échappe à la plupart des méthodes de détection les plus sensibles, a été étudiée « in vitro » par de nombreux chercheurs (SHURYGINA, 1958 ; MAKENZIE, MELDAU, 1959 ; GASTUCHE, BRUGGENWERT, MORTLAND, 1964 ; SCHWERTMANN, 1966).

Les hydroxydes de fer fraîchement précipités se révèlent lors de leur cristallisation très sensibles aux conditions physico-chimiques du milieu, notamment à la nature et à la concentration des ions étrangers présents.

Les observations faites dans la nature sont aussi nombreuses (D'HOORE, 1954 ; HERBILLON, FRANKART, VIELVOYE, 1966 ; TAYLOR, GRALEY, 1967 ; HERBILLON, TRAN VINH AN, 1969). Le fer libéré des roches lors des processus d'altération peut soit précipiter immédiatement, soit participer à la formation de minéraux secondaires, soit migrer dans le paysage suivant les conditions d'oxydo-réduction, le pH et la concentration (DELVIGNE, 1965) pour précipiter peu après. La présence de formes non cristallisées hydratées du fer (dit souvent « libre ») y est considérée comme une forme transitoire évoluant vers la goëthite, la maghémite ou l'hématite, ou plus rarement vers la magnétite et la wustite et caractérisant plutôt un état dynamique du système (KORNAKOV, RODE, 1928). Lors de la précipitation des formes bien cristallisées vont s'individualiser et les formes moins bien cristallisées vont s'associer plus ou moins aux minéraux primaires et secondaires.

Les contradictions commencent lorsqu'on cherche à savoir quelle est la forme de ces particules infiniment petites (50 à 100 Å), leur charge et la nature de leurs liaisons avec les argiles, si elle existent réellement (FOLLETT, 1965 ; DAVIDTZ, SUMNER, 1965 ; GREENLAND, OADES, SHERWIN, 1965). Sont-elles fixées sur une partie seulement des argiles ou les recouvrent-elles entièrement comme des « coatings » ? La couleur du sol a été mise depuis longtemps en relation avec le fer « libre » (KAMOSHITA, YAMADA, 1956 ; KODJIMA, 1962) et récemment il a été confirmé (SEGALÉN, 1969) que les formes amorphes de composés du fer influencent fortement la couleur du sol. Certains travaux toutefois nient l'existence d'une relation entre la couleur du sol et l'épaisseur des « coatings » de fer « libre » incriminant plutôt la forme et le degré d'hydratation du fer (SOILEAU, Mc CRACKEN, 1967 ; KODJIMA, KAWAGUCHI, 1968).

Quant aux relations entre les différentes formes de composés du fer et les autres propriétés physiques et chimiques du sol, les quelques travaux qui existent montrent également une divergence d'opinions : certains attribuent aux horizons du sol contenant les teneurs maximales en produits mal cristallisés un caractère propre qu'ils utilisent même comme diagnostic (classification belge SYS, 1961 ; HERBILLON, FRANKART, VIELVOYE, 1966 ; NALOVIC, 1970). D'autres ne constatent aucune modification des propriétés après extraction de ces produits (DESHPANDE, GREENLAND, QUIRK, 1968). Les travaux existants suggèrent que la plus grande partie des formes amorphes de composés du fer est associée à la fraction inférieure à 0,2 mm (TARDY, 1969) ou à 2 μ (HERBILLON, FRANKART, VIELVOYE, 1966) ou même à 0,2 μ (SOILEAU, Mc CRACKEN, 1967).

Il a paru intéressant d'étudier à notre tour les différentes formes de composés du fer dans quelques sols caractéristiques du Cameroun et de préciser à quelle fraction du sol ces formes de fer se trouvent associées. Cette étude nous a conduit à poser quelques questions concernant l'origine des formes amorphes des composés du fer, leur stabilité dans le temps et dans le paysage et leur influence sur d'autres propriétés physiques et chimiques du sol. Certains de ces problèmes font l'objet d'une étude détaillée : relations entre formes du fer et éléments traces (NALOVIC, 1970), relations avec densité et porosité (HUMBEL, 1970).

1. MÉTHODES D'ANALYSE

Les techniques d'analyse utilisées pour cette étude sont celles pratiquées dans les Laboratoires de l'ORSTOM.

1. TENEUR EN PSEUDO-SABLES

La méthode classique par dispersion au pyrophosphate de sodium qui a été utilisée ne permet pas de détruire les pseudo-particules contenues en abondance dans certains sols. C'est pourquoi une seconde prise de chaque échantillon a subi, après destruction des matières organiques par l'eau oxygénée, un lavage à l'eau sur un tamis de 50 μ au cours duquel les pseudo-particules ont été écrasées entre les doigts. La différence des teneurs en sables entre les deux traitements donne la teneur en pseudo-sables. Pour séparer la matière fine des pseudo-sables on recueille la partie qui après écrasement aux doigts passe à travers le tamis.

2. SÉPARATION DES FRACTIONS

Les teneurs des fractions appelées argile et sables dans cette étude sont celles des fractions 0-50 μ et 50-2 000 μ obtenues après écrasement des pseudo-sables de la terre tamisée à 2 mm. Par conséquent :

Fraction argile = argile (0-2 μ) + limons (2-50 μ) + matière fine des pseudo-sables.

Fraction sables = sables fins vrais et sables grossiers vrais.

La fraction concrétions séparée au tamis de 2 mm est exprimée en % du sol brut. Les fractions argile et sables proviennent parfois de la matrice de ces concrétions, mais plus souvent de l'horizon fin sus-jacent.

3. DOSAGES DU FER

C'est sur les fractions ainsi séparées et exprimées qu'ont été effectués les dosages du fer total et des formes amorphes (pour le sol NGD 256, la fraction pseudo-sables a été en outre analysée séparément).

Fer total : Analyse aux trois acides (méthode Harisson modifiée par les Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy).

Formes amorphes du fer : Méthode d'extractions successives par l'acide chlorhydrique 8 N à froid et la soude 0,5 N à chaud (SEGALEN, 1968). Les fractions supérieures à 50 μ ont été broyées et passées également au tamis de 0,2 mm.

INTERPRÉTATION DES COURBES D'EXTRACTION

Les courbes d'extraction présentent une montée d'abord rapide, puis de plus en plus lente. Au bout d'un certain nombre de traitements, les points s'alignent suivant une droite qui a été prolongée jusqu'à

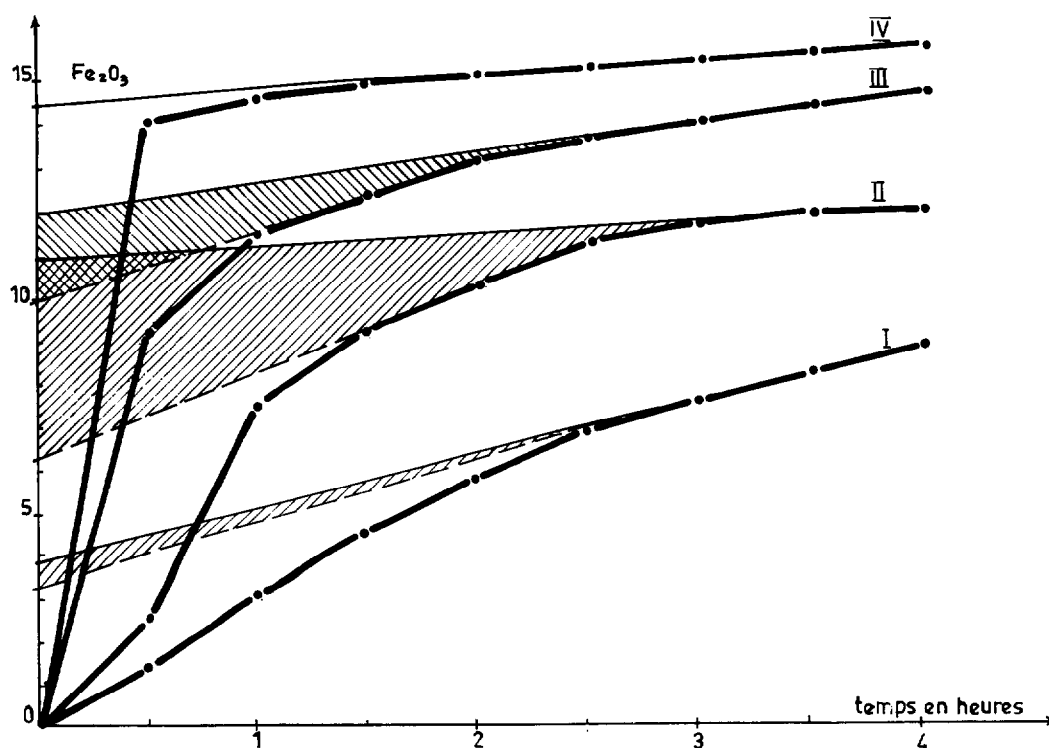
son intersection avec l'axe des y (voir figure suivante). Bien souvent cependant les derniers points de l'extraction s'alignent suivant une autre droite différant de la précédente par une pente plus faible. Ce second alignement a été également prolongé jusqu'à son intersection avec l'axe des y .

Il a été considéré que la portion de courbe de montée rapide, puis chacun des alignements suivants, traduisent l'existence de composés ferrugineux différents. L'examen aux rayons X complété par l'A.T.D. confirme dans la plupart des cas la présence d'un même nombre de formes de fer. Cependant le contrôle par les rayons X de l'épuisement des différentes formes de fer correspondant à chaque changement de pente au cours de l'extraction n'a pas été effectué comme l'avait fait SEGALIN (1968). Il a été considéré que l'intersection avec l'axe de y des différents alignements indiquait la teneur de l'espèce précédemment épuisée comme l'a fait SEGALIN (1968) pour la détermination des teneurs en produits minéraux amorphes*.

Le premier alignement détermine la teneur en hydroxydes hydratés de fer qu'on appellera ici fer « amorphe ». Le second, d'extraction moins facile, a été appelé fer « intermédiaire ». Enfin la différence

$$\text{fer total} - (\text{fer amorphe} + \text{fer intermédiaire})$$

sera appelée par convention fer « cristallisé ». Il représente à la fois le fer incorporé au réseau d'un minéral résistant et les formes individualisées peu solubles, primaires ou néoformés.



Types de courbes d'extraction.

* A la différence de la méthode citée en référence, nous avons présenté l'articulation des points d'extraction sans en arrondir la courbe. Par ailleurs les produits amorphes ont été considérés comme épuisés non pas après le premier changement de pente de la courbe mais après obtention d'un véritable alignement des points.

De cette manière, l'intersection des droites avec l'axe des y est située plus haut ce qui explique que les teneurs en composés amorphes obtenues ainsi soient relativement élevées comparativement à celles obtenues par SEGALIN.

Il a été effectué sur chaque échantillon 8 traitements représentant 4 heures d'extraction. Une attaque encore plus longue pourrait donner un nouvel alignement traduisant la présence d'une autre forme du fer. Si la courbe ne présente qu'un alignement et que le fer total n'est pas épuisé au bout de 4 heures d'extraction la teneur en fer « intermédiaire » peut être sous-estimée.

On observe quatre types de courbes d'extraction présentés ci-contre qui diffèrent essentiellement par la forme de la première portion :

Type I : Les points d'extraction sont alignés dès l'origine puis la courbe s'incurve, tardivement, mais bien avant épuisement du fer disponible. Il a été considéré que le premier alignement avec l'origine correspondait à une forme hydratée d'hydroxyde de fer, celle-ci présentant une facilité d'extraction régulière. Il n'est pas exclu toutefois qu'un changement de pente tardif révèle l'existence d'autres formes de composés du fer.

Type II : Le second traitement acide extrait plus de fer que le premier précédé ou non d'un traitement à la soude. Ceci amène à penser que la forme amorphe du fer n'est accessible qu'après dissolution d'une couche ferrugineuse moins soluble qui la protège. Puis, on observe un ou plusieurs alignements correspondant à d'autres formes de composés du fer.

Type III : L'extraction est importante pendant la première heure puis on obtient un alignement de points. Les extractions finales nettement moins importantes réalisent un second alignement. Le fer total n'étant pas épuisé à ce stade nous avons conclu à la présence de trois formes de fer de facilité d'extraction décroissante.

Type IV : Tout le fer de forme amorphe est donné par la première extraction et la courbe présente ensuite une pente uniforme.

Dans le premier et le quatrième cas, l'amplitude de variation correspondant au fer « intermédiaire » est faible et de l'ordre de grandeur de l'incertitude des mesures. Dans le deuxième et le troisième cas au contraire, la variation est importante et les alignements successifs pourraient témoigner de l'existence de plusieurs formes de composés de fer différant par leur facilité d'extraction, voire leur degré de cristallinité.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats sont présentés par profil dans des tableaux. Les teneurs en fer sont exprimées en % du matériel séché à 105°. Un chiffre entre parenthèse indique pour les fractions sables et argile leur teneur en fer rapportée au sol total. Une astérisque signale les teneurs en fer « intermédiaire » et « cristallisé » qui peuvent être respectivement sous-estimées et sur-estimées du fait que la totalité du fer disponible n'a pas été extraite après 4 heures de traitement.

2. LES SOLS ÉTUDIÉS

Les 10 sols étudiés comportent 4 sols ferrallitiques, 3 sols fersiallitiques, 1 vertisol et 2 sols bruns.

2.1. LES SOLS FERRALLITIQUES

Ce sont :

- 1 sol ferrallitique rouge sur le basalte de l'Adamaoua : NGD 256
- 1 sol ferrallitique rouge sur l'embranchement de Yaoundé : HY 6

1 sol ferrallitique ocre sur l'embranchite de Yaoundé : HY 2
 1 sol ferrallitique jaune sur le sédimentaire de Douala : KOM 4

Dans chaque profil, l'étude des formes du fer a été effectuée à différents niveaux dans les horizons B et BC. L'échantillon caractéristique qui a été présenté dans cette étude comme sol total est, parmi les horizons les plus riches en fer, celui qui contenait le plus d'argile.

NGD 256 a pour coordonnées géographiques et climatiques :

| | |
|----------------|-----------------------------------|
| Lat. 7°27' N | Climat Tropical humide d'altitude |
| Long. 13°25' E | Pluviométrie 1 575 mm |
| Alt. 1 100 m | Température 22°2 |

Il est situé sous une forêt claire résiduelle, au sommet d'un vaste interfluve et dérive du basalte ancien à olivine de l'Adamaoua.

Il est formé d'une partie rouge (10 R 3/6) friable, riche en pseudo-sables, épaisse de 2,0 m, qui sert ensuite de matrice à un horizon formé de morceaux de basalte ferruginisés, puis, vers 5,5 m, les morceaux de basalte deviennent bleutés et cassables à la main. Ce sol est fortement désaturé en cations échangeables. Par écrasement des pseudo-sables, sa teneur en argile passe de 20 % à 80 %. L'échantillon de sol total est pris à 1 m de profondeur et celui des concrétions à 2,5 m.

HY 6 a pour coordonnées :

| | |
|----------------|-----------------------|
| Lat. 3°50' N | Climat sub-équatorial |
| Long. 11°30' E | Pluviométrie 1 575 mm |
| Alt. 700 m | Température 23°5 |

Il est situé sur la forte pente d'un talweg limitant l'aérodrome de Yaoundé et dérive d'un gneiss embranchite grenatifère à biotite.

La partie meuble de ce sol a été enlevée par des engins de terrassement. La partie concrétionnée est épaisse de 4 m et c'est elle qui a été étudiée ici. La matrice qui l'emballage est rouge (2,5 YR 3/6), structurée, argileuse (90 % de colloïdes) si l'on inclut la matière fine des pseudo-sables (50 %). Elle devient plus abondante à la base. La roche altérée apparaît vers 6 m de profondeur, précédée par un horizon bariolé, assez limoneux et riche en squelettes de minéraux. Ce sol est fortement désaturé en cations échangeables. L'échantillon caractéristique décrit ici a été prélevé à 1,5 m de profondeur dans la partie concrétionnée.

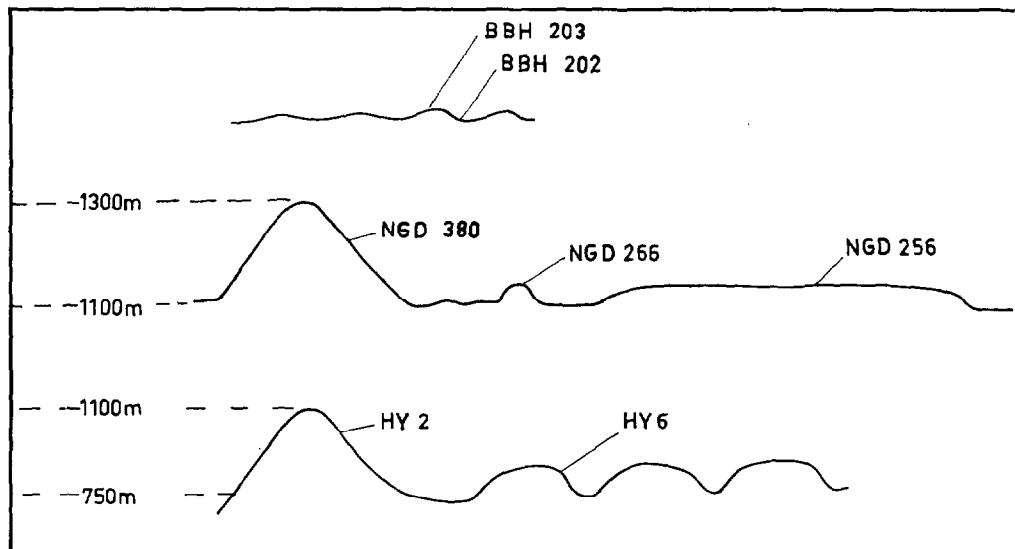
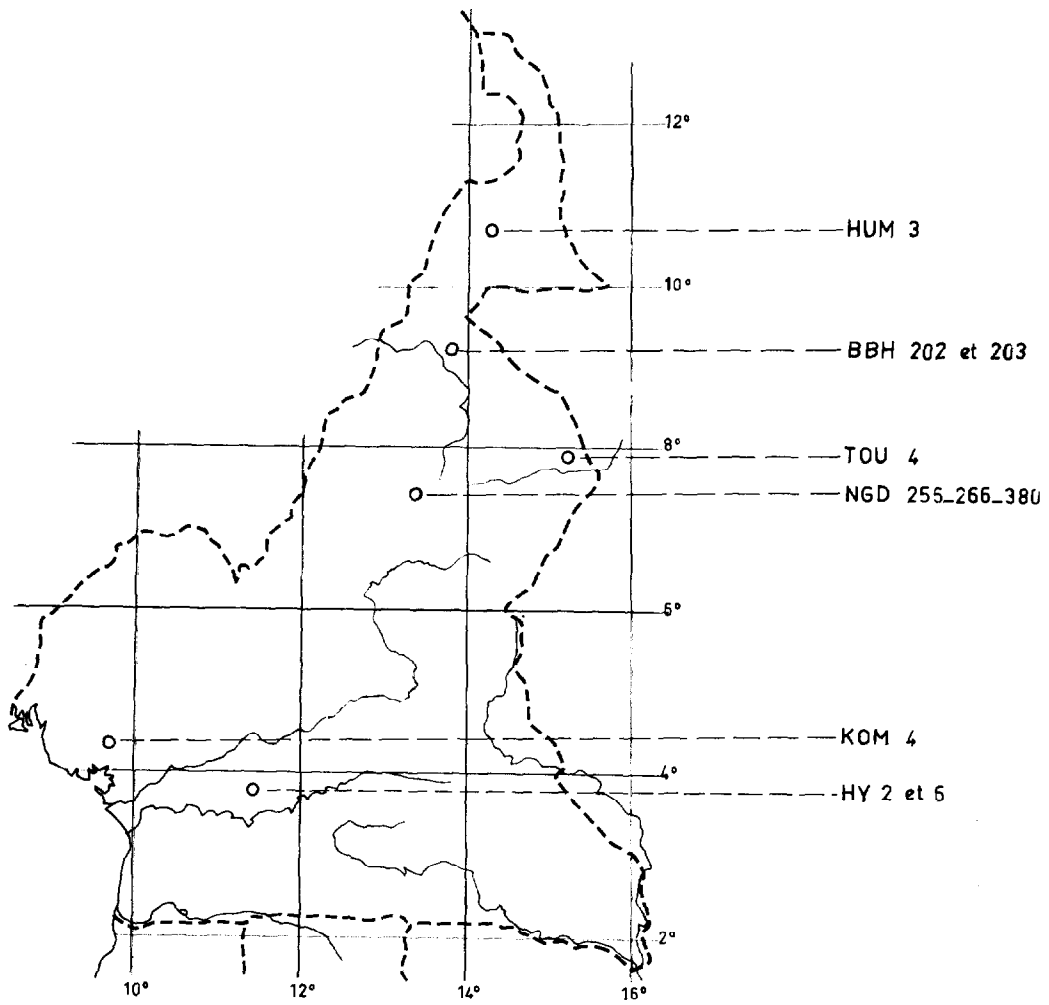
HY 2 a pour coordonnées :

| | |
|----------------|----------------------------------|
| Lat. 3°54' N | Climat sub-équatorial d'altitude |
| Long. 11°29' E | Pluviométrie 1 575 mm |
| Alt. 1 050 m | Température 23°5 (Yaoundé) |

Il est situé près du sommet du Mont Fébé, inselberg qui domine la ville de Yaoundé, et formé de la même embranchite que HY 6. La pente est forte (80 %), le sol peu épais, l'horizon C débutant à 0,8 m. L'horizon B₂ épais de 50 cm, argileux (45 %) avec peu de pseudo-sables, de couleur brun-rouge (5 YR 4/4) de structure polyédrique, comprend une partie fine épaisse de 30 cm d'où provient l'échantillon de sol total étudié et une partie concrétionnée, de 20 cm d'épaisseur, où a été prise la fraction concrétions. Ce sol est moyennement désaturé en cations échangeables.

KOM 4 a pour coordonnées :

| | |
|---------------|-----------------------|
| Lat. 4°22' N | Climat équatorial |
| Long. 9°35' E | Pluviométrie 4 000 mm |
| Alt. 80 m | Température 26°4 |



Situation géographique et topographique des profils étudiés

Il est situé sous forêt secondaire à 52 km au nord de Douala, sur la pente (20 %) d'un talweg et il dérive d'un matériau sédimentaire éocène argilo-ferrugineux. Il comprend une partie jaune (10 YR 5/6) épaisse de 3 m, argileuse (45 %) sans pseudo-sables, peu structurée. L'échantillon de sol total étudié ici en provient, et il a été prélevé à 1,7 m. Une petite couche de dragées de quartz sépare cette partie fine d'un horizon épais de 2 m, contenant 20 % de concrétions de roche ferruginisée (formant la fraction concrétions étudiée ici). Ce sol est fortement désaturé en cations échangeables.

2.2. LES SOLS FERRALLITIQUES

Ce sont :

| | | |
|--|-----|-----|
| Un sol ferrugineux à concrétions sur altération ferrallitique (granite) de Touboro | TOU | 4 |
| Un sol rouge tropical sur roche verte de Maroua | HUM | 3 |
| Un sol rouge tropical sur micaschiste de Bibemi | BBH | 203 |

TOU 4 a pour coordonnées :

| | | |
|------|----------|------------------------------------|
| Lat | 7°46' N | climat tropical de tendance humide |
| Long | 15°19' E | pluviométrie 1 370 mm |
| Alt | 530 m | température 28° |

Il est situé sous savane arborée sur un glacis en pente très faible soumis à l'érosion en nappe. L'horizon B₂ qui débute à 50 cm est épais de 60 cm, de couleur ocre (5 YR 5/8), peu argileux (25 %), structuré en polyèdres et englobe quelques concrétions et des restes minéraux. Il a fourni l'échantillon étudié ici. Son taux de saturation est de 40 %.

HUM 3 a pour coordonnées :

| | | |
|-------|----------|-------------------------|
| Lat. | 10°59' N | climat soudano-sahélien |
| Long. | 14°17' E | pluviométrie 804 mm |
| Alt. | 500 m | température 28°5 |

Il est situé sur une colline du massif de roches vertes dominant Maroua (pente de 50 %) et dérive d'une roche basique verte du complexe vulcano-métamorphique. La surface du sol est caillouteuse, sous savane arbustive. L'horizon B₂ épais de 30 cm débute à 25 cm, il est rouge (2,5 YR 3/6), argilo-sableux avec 30 % de cailloux friables, saturé en cations échangeables, fortement structuré en polyèdres lissés. L'échantillon étudié en provient. L'horizon BC est peu épais, puis l'on passe à la roche altérée dont les joints contiennent de l'argile rouge à leur partie supérieure.

BBH 203 a pour coordonnées :

| | | |
|-------|----------|---------------------------|
| Lat. | 9°19' N | climat tropical soudanais |
| Long. | 13°56' E | pluviométrie 930 mm |
| Alt. | 300 m | température 28° |

Il est situé dans un paysage finement disséqué, à l'est de Bibemi sur le sommet d'un petit interfluve. La surface du sol, sous savane arborée, est caillouteuse. La roche altérée, un micaschiste qui débute à 50 cm de profondeur, englobe de la terre rouge dans ses joints. L'horizon B₂ est épais de 15 cm, de couleur rouge (2,5 YR 4/6), de texture sablo-argileuse, fortement structuré en polyèdres et presque saturé en cations échangeables. L'échantillon étudié en provient.

2.3. LE VERTISOL BBH 202

Situé sur la pente du sol précédent. La roche altérée, qui englobe des poches d'horizon B, débute à 90 cm. L'horizon B₂ s'étend de 10 à 90 cm. Il est argileux (45 %) de teinte noirâtre (10 YR 3/2), fortement structuré en prismes, puis en plaquettes obliques. L'échantillon présenté ici provient de la partie prismatique.

2.4. LES SOLS BRUNS EUTROPHES

Ce sont :

Un sol brun peu évolué sur basalte bulleux de l'Adamaoua : NGD 266

Un sol brun ferruginisé sur gabbro de l'Adamaoua : NGD 380

Les coordonnées de ces sols proches l'un de l'autre sont :

| NGD 266 | NGD 380 | |
|----------------|----------|-----------------------------------|
| Lat. 7°21' N | 7°18' N | climat tropical humide d'altitude |
| Long. 13°27' E | 13°18' E | pluviométrie 1 575 mm |
| Alt. 1 160 m | 1 200 m | température 22°2. |

NGD 266 est situé sur un petit dôme de lave bordant un cratère d'explosion récent. La lave bulleuse rougie est un basalte à olivine très riche en fer, avec labrador, olivine et augite, de structure microlitique porphyrique avec un peu de verre. Ce sol contient de nombreux morceaux de basalte altéré emballés dans une matrice brun-rouge (5 YR 4/4) grumeleuse, saturée en cations à 70 % qui constitue l'échantillon présenté ici (horizon BC).

NGD 380 est situé sur un inselberg à décomposition en boules dominant de 150 m. Il dérive d'un gabbro amphibolique à olivine (plagioclase, hornblende verte, sphène, olivine, chlorite, magnétite, pyroxène). Il contient beaucoup de cailloux à la partie supérieure. L'horizon B₂ épais de 15 cm est brun-rouge (2,5 YR 3/4), argilo-sableux (45 %) peu structuré. L'horizon BC qui débute à 35 cm est formé de blocs de roche altérée entourés d'une matrice rouge qui constitue l'échantillon présenté ici. Il est saturé à 80 % en cations échangeables.

3. LES FORMES DES COMPOSÉS DU FER

3.1. LES FORMES DES COMPOSÉS DU FER DANS DEUX SOLS FERRALLITIQUES ROUGES

3.1.1. Dans le sol total

Le sol NGD 256 qui dérive d'un basalte à olivine, roche riche en fer (15 %) contient 20 % environ de fer total dont les 8/10 sont sous forme amorphe. Ce sol est donc enrichi en fer par rapport à la roche (20/15), mais une accumulation relative suffit à l'expliquer. A l'examen micromorphologique d'ailleurs

le plasma de ce sol apparaît très homogène. Riche en produits amorphes ce sol se révèle également très riche en éléments traces métalliques : $\Sigma M^* = 5,2$ millimoles % (NALOVIC, 1970) et de très faible densité apparente : 1,0 (HUMBEL, 1970). La composition minéralogique de la fraction fine est, dans l'ordre d'importance, kaolinite, gibbsite et hydroxydes hydratés de fer qui augmentent avec la profondeur, avec en outre, en haut du profil, de l'hématite qui disparaît vers la profondeur au profit de la goethite.

Le sol HY 6 qui dérive d'une embréchite moyennement pourvue en fer (7 % dans l'horizon C) contient, dans son épaisse partie concrétionnée qui constitue presque tout le profil, 50 % de fer total dont les 2/10 seulement sont sous forme amorphe. Ce sol est donc très fortement enrichi en fer par rapport à la roche (50/7). Une telle concentration, comparée aux teneurs en sables quartzeux, est la marque d'une accumulation absolue qui est également confirmée par l'examen micromorphologique. Ce sol contient en valeur absolue autant d'éléments traces métalliques que le précédent ($\Sigma M = 4,1$ millimoles %) ; sa teneur rapportée au fer est donc nettement moindre. Sa densité apparente est élevée : 1,8. La composition minéralogique de la fraction fine est : kaolinite (+++), gibbsite, hydroxydes hydratés de fer, hématite, goethite dans la fraction fine et kaolinite (+++), hydroxydes hydratés de fer et hématite dans les concrétions.

3.1.2. Dans les différentes fractions

NGD 256 : Examen des courbes d'extraction (fig. 1)

Pour la fraction argile la courbe est du type IV. La teneur en fer intermédiaire est négligeable, sous réserve d'un léger changement de pente avant l'extraction totale. Pour les sables, la courbe est du type II et la teneur en fer intermédiaire est notable. Elle est moindre dans les concrétions et le sol total dont les courbes sont du type III.

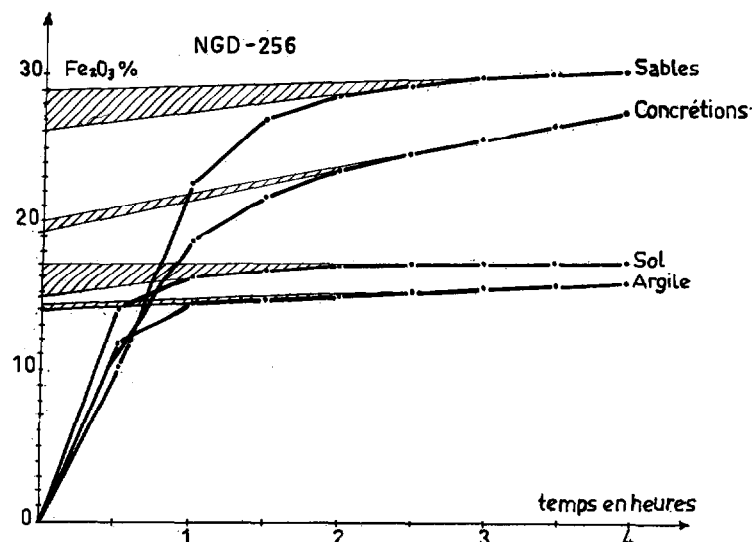


FIG. 1. — Courbes d'extraction NGD 256.

* ΣM = Somme des éléments traces - métaux lourds : Mn, Pb, Ga, Cr, V, Cu, Ni, Co.

Quatre heures de traitement Segalen ont extrait pratiquement tout le fer de ce sol qui s'avère donc peu résistant. Dans la fraction sables, le second traitement acide en extrait même plus que le premier. Il existe probablement une cuticule extérieure plus résistante.

TENEURS DES DIFFÉRENTES FRACTIONS (tableau I)

Le fer total et de forme amorphe est associé aux trois fractions étudiées mais plus fortement aux fractions grossières, sables et concrétions (30 % de fer total et respectivement 26 et 19 % de forme amorphe) ; mais comme les sables vrais ne représentent que 6 % de la masse et que les concrétions sont peu concentrées dans un horizon peu épais, ces fractions contribuent faiblement aux réserves en fer. La plus grande partie du fer de ce sol est ainsi localisée dans la fraction argile qui en constitue les 9/10. Cette répartition est en faveur d'une accumulation relative.

Le rapport fer cristallisé/fer total est nettement plus élevé dans les concrétions (33 %) que dans l'argile (16 %) et les sables (8 %). Ce peut-être dû à l'abondance de goethite dans les concrétions.

TABLEAU I
PROFIL NGD 256. FORMES DE Fe₂O₃

| Fraction étudiée ¹ | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|-------------------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 17,7 | 14,8 | 2,3 | 0,6 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 94 | 16,8 (15,8) | 14,0 (13,2) | 0,2* (0,2) | 2,6* (2,4) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 6 | 31,6 (1,9) | 26,2 (1,6) | 2,6 (0,2) | 2,8 (0,2) |
| Concrétions > 2 mm | 56 | 29,3 | 19,3 | 0,7 | 9,3 |

Dans chaque tableau :

Les résultats sont exprimés en % du matériau séché à 105°.

Les chiffres entre parenthèses indiquent relativement au sol total la part due à la fraction considérée. Par exemple les 17,7 % de fer total sont répartis à raison de 15,8 dans l'argile et 1,9 dans les sables.

L'astérisque signale les teneurs en fer de forme intermédiaire et de forme cristallisée qui peuvent être respectivement sous-estimées et sur-estimées du fait que la totalité du fer disponible n'a pas été extraite au bout de quatre heures de traitement Segalen.

HY 6 : Examen des courbes d'extraction (fig. 2)

Pour le sol total, la courbe d'extraction est du type III donnant une quantité notable de fer intermédiaire. Pour les concrétions et les sables, les courbes sont du type I et l'on observe un changement de pente tardif (trois heures). Il y a donc à cet instant épuisement d'une forme de fer qui est soit amorphe soit cristallisée, mais de toutes façons plus vulnérable que celle qui reste. Elle a été considérée comme amorphe parce qu'un second changement de pente apparaît ultérieurement, portant à trois le nombre de formes du fer, ce qui est en accord avec l'ATD et RX. Dans la fraction sables la forme intermédiaire est négligeable ou sous-estimée puisque 75 % seulement du fer est extrait à la fin de l'expérience. Dans

la fraction concrétions le fer intermédiaire déterminé par la deuxième pente de la courbe est important. L'expérience n'ayant pas été menée jusqu'à épuisement du fer, on ne peut donc préciser si ce fer intermédiaire représente une forme mal cristallisée ou une des deux formes cristallines décelées par l'ATD et RX. La courbe d'extraction de la matrice est semblable à celle de l'argile qui en constitue les 9/10.

Quatre heures de traitement Ségalen ont extrait 75 % du fer des concrétions et 90 % du fer de la fraction argile. Sa cristallinité est donc meilleure qu'en NGD 256.

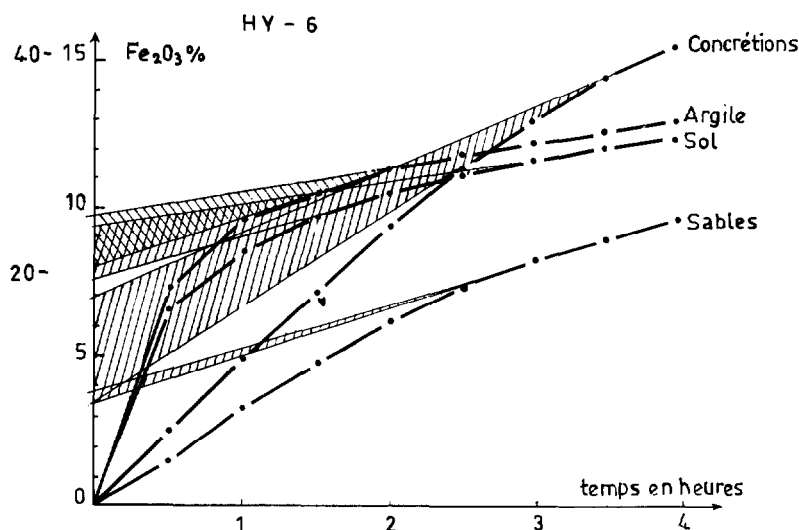


FIG. 2. — Courbes d'extraction HY 6.

TENEURS DES DIFFÉRENTES FRACTIONS (tableau II)

Le fer total et le fer sous forme amorphe sont associés principalement aux concrétions (55 % de fer total dont 1,5/10 est sous forme amorphe). La matrice qui les emballe contient 14 % de fer total dont la moitié est sous forme amorphe. Les sables de la matrice contiennent autant de fer total que les argiles, mais moins de formes amorphes (1/4).

TABLEAU II
PROFIL HY 6
FORMES DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0-2 mm..... | (%) 100 | 13,8 | 7,5 | 1,8 | 4,5 |
| Argile 0-0,05 mm | 90,5 | 13,9 (12,6) | 7,9 (7,2) | 1,8* (1,6) | 4,2* (3,8) |
| Sables 0,05-2 mm | 9,5 | 12,5 (1,2) | 3,4 (0,3) | 0,4 (0,1) | 8,7 (0,8) |
| Concrétions > 2 mm | 82 | 55,4 | 9,2 | 9,2 | 37,0 |

3.1.3. Les formes du fer dans les pseudo-sables de NGD 256

Vu la forte proportion de formes amorphes du fer dans ce sol, l'aspect particulier de certaines courbes d'extraction (type II) et l'abondance des pseudo-sables, il a paru intéressant d'étudier les formes du fer dans la partie fine constituant ces pseudo-sables.

La dispersion au pyrophosphate après destruction de la matière organique a donné un pourcentage d'argile de 20 %, alors qu'après écrasement entre les doigts des pseudo-sables sur un tamis de 50 μ , ce pourcentage atteint 80 %. Ce sol contient donc environ 60 % de pseudo-particules dont la plus grande partie entre dans les fractions sables. En opérant sans destruction de la matière organique le pourcentage d'argile reste voisin de 20 %. On ne peut donc attribuer la cimentation des pseudo-particules à une substance organique. La nature et la disposition des matériaux constituant les pseudo-particules ne sont donc pas d'origine biologique.

L'étude des courbes d'extraction des formes du fer sur la fraction sable vrai et sur la fraction sable + pseudo-sables donne les résultats suivants : forte teneur en fer total (31,6 %) et de forme amorphe rapidement extrait (26,2 %) dans la fraction sable vrai, qui compte quelques quartz, quelques grains de magnétite et une majorité de très petites concrétions. Dans la fraction sables + pseudo-sables, on obtient 21 % de fer total et 17 % de fer de forme amorphe. Etant donné que les sables vrais représentent 1/10 seulement de cette fraction, on peut calculer la teneur en fer total et fer de forme amorphe de la matière fine des pseudo-sables, qui sont respectivement 19,7 % et 16 %. Cette partie fine est donc plus riche en fer que les fractions argile et limon libres.

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer am./Fer total |
|---|-----|-----------|-----------------|-------------------|
| | (%) | | | (%) |
| Sol total | 100 | 17,7 | 14,8 | 84 |
| Sables 50-2 000 μ | 6 | 31,6 | 26,2 | 83 |
| Argile liée aux pseudo-sables 50-2 000 μ | 54 | 19,7 | 16,0 | 81 |
| Limon 20-50 μ | 20 | 16,5 | 14,3 | 87 |
| Argile libre 0-20 μ | 20 | 9,1 | 8,7 | 96 |

Donc plus la fraction est grossière, plus elle contient de fer total et de forme amorphe. 60 % du fer total et de forme amorphe du sol sont stockés dans la partie fine des pseudo-sables.

Les courbes d'extraction des formes amorphes du fer et de l'alumine effectuées sur la fraction sable + pseudo-sables non broyée diffèrent nettement de celles obtenues après le broyage à 200 μ . Il est possible d'expliquer cette différence par une structure des pseudo-sables en couches concentriques, différant par leurs teneurs respectives en fer ou alumine (voir 3.6).

3.1.4. Comparaison entre les deux sols rouges

La fraction argile de ces deux sols rouges est également riche en fer total, mais le sol sur basalte contient plus de fer sous forme amorphe. Ces deux sols se différencient nettement par leurs teneurs en

fer total dans les fractions plus grossières : 30 % dans les sables et les concrétions de NGD 256, et respectivement 12 et 55 % dans les sables et les concrétions de HY 6. Il en est de même pour les formes amorphes des composés du fer qui constituent 80 % du fer de la fraction sable et 65 % de la fraction concrétions de NGD 256, contre seulement 17 et 27 % dans les fractions correspondantes de HY 6.

Dans ces deux sols rouges riches en fer, celui-ci provient en NGD 256 d'une accumulation relative et en HY 6 d'une accumulation absolue. Les différences observées entre les formes du fer dans les différentes fractions paraissent indiquer que le fer transporté en solution (apport absolu) manifeste une nette tendance à cristalliser sous la forme de concrétions, au contraire du fer libéré sur place (accumulation relative) qui persiste sous forme amorphe dans les fractions sables et argile.

3.2. LES FORMES DU FER DANS LE SOL OCRE ET LE SOL JAUNE FERRALLITIQUES

3.2.1. Dans le sol total

Le sol ocre HY 2 qui dérive de la même embréchite que HY 6 (7 % de fer) contient 11 % de fer total dont plus de la moitié est sous forme amorphe. Le rapport fer du sol/fer de la roche altérée est donc de 11/7. La teneur en éléments trace métalliques est moyenne ($\Sigma M = 1,3$ millimoles %). La composition minéralogique de la fraction fine est : hydroxydes hydratés de fer, hématite, gibbsite et un peu de kaolinite et goethite dans les concrétions.

Le sol jaune KOM 4, qui dérive d'une formation sédimentaire bien pourvue en fer (13 %), ne contient plus que 5 % de fer total dont les 4/10 sont sous forme amorphe. Le rapport fer du sol/fer du matériau est donc de 5/13. Sa teneur en éléments traces métalliques est très faible ($\Sigma M = 0,5$ millimoles %).

La composition minéralogique de la fraction fine est : kaolinite (+ + +) gibbsite (+) et un peu d'hydroxydes hydratés de fer, d'hématite et de goethite. La densité apparente des sols jaunes est généralement un peu plus élevée (1,4 à 1,5) que celle des sols rouges ferrallitiques (0,9 à 1,3).

Ces sols ocre et jaune contiennent donc bien moins de fer total et sous forme amorphe que les sols rouges étudiés. Le sol jaune apparaît nettement lessivé en fer relativement au matériau originel et c'est la forme cristallisée qui résiste le mieux à ce lessivage.

3.2.2. Dans les différentes fractions

HY 2 : Examen des courbes d'extraction (fig. 3)

Pour l'argile et le sol total, les courbes, de type III, présentent deux changements de pente qui indiquent une quantité notable de fer de forme intermédiaire. Pour les sables, la courbe est du type II et le fer intermédiaire, déterminé par un chargement de pente tardif, est abondant. Le premier traitement à l'acide dissout moins de fer que le second. Pour les concrétions, la courbe, du type IV, révèle une grande quantité de forme amorphe mais relativement peu de forme intermédiaire du fer.

Quatre heures de traitement Ségalen ont extrait seulement 75 % de fer total dans le sol mais 100 % dans les sables, 90 % dans l'argile et 88 % dans les concrétions où le fer paraît donc mieux cristallisé. On constate que la séparation des fractions améliore l'extraction.

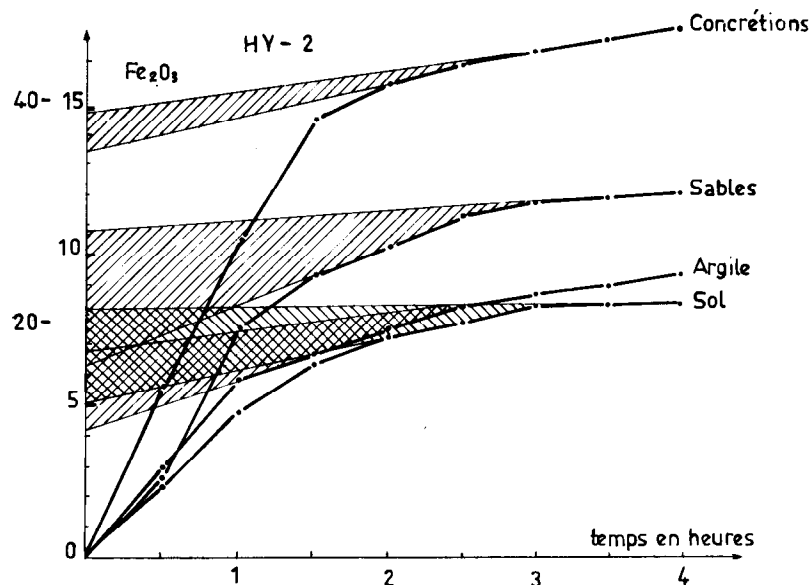


FIG. 3. — Courbes d'extraction HY 2.

TENEURS DES DIFFÉRENTES FRACTIONS (tableau III)

Dans ce sol, le fer total (dont les 4/10 sont sous forme amorphe), est associé en proportions voisines à l'argile (10 %) et aux sables (12 %), mais les concrétions en contiennent plus de 50 % (dont les 3/4 sont sous forme amorphe).

TABLEAU III
PROFIL HY 2 FORMES DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interm. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm..... | (%) 100 | 11,3 | 5,1 | 3,4 | 2,8 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 57,7 | 10,5 (6,0) | 4,2 (2,4) | 2,6 (1,5) | 3,7 (2,1) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 42,3 | 12,4 (5,3) | 6,4 (2,7) | 4,4 (1,9) | 1,6 (0,7) |
| Concrétions > 2 mm..... | 40 | 53,9 | 36,4 | 3,5 | 14,0 |

KOM 4 : Examen des courbes d'extraction (fig. 4)

Les courbes d'extraction sont du type II pour le sol et l'argile qui en constitue 60 %. Une dissolution totale du fer de forme amorphe nécessite une répétition du traitement acide*, ce qui pourrait expliquer

* En effet, ce retard de dissolution est observé aussi en l'absence de tout traitement à la soude.

sa persistance dans ce sol lessivé acide. Pour les sables, l'interprétation est difficile du fait de la teneur très faible en fer de cette fraction. Pour les concrétions, la courbe, du type III, révèle une quantité importante de fer sous forme amorphe (75 %).

Quatre heures de traitement Ségalen ont extrait seulement 65 % du fer du sol, mais 90 % du fer des concrétions.

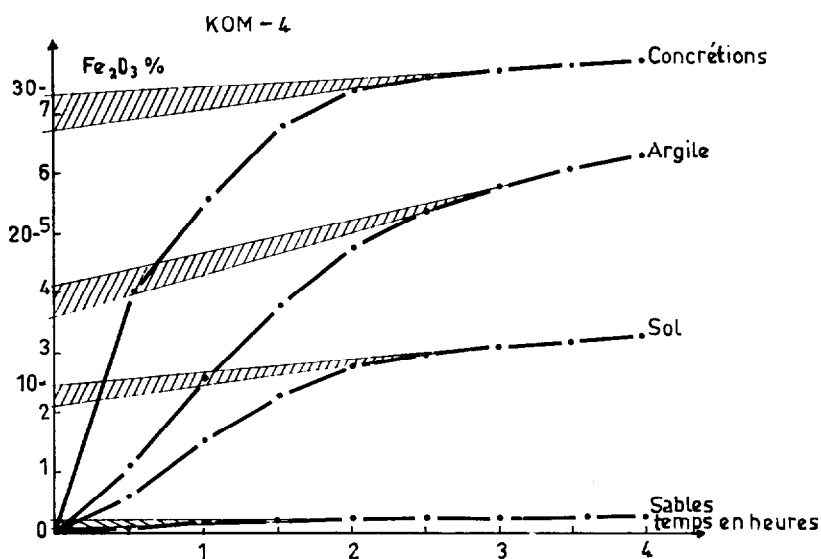


FIG. 4. — Courbes d'extraction KOM 4.

TENEURS DES DIFFÉRENTES FRACTIONS (tableau IV)

Dans ce sol, le fer total est associé essentiellement à la fraction argile (les 4/10 y sont sous forme amorphe), car il y a très peu de fer total et de fer sous forme amorphe associé à la fraction sable. Au contraire, les concrétions contiennent 37 % de fer total dont les 3/4 sont sous forme amorphe.

TABLEAU IV
PROFIL KOM 4 FORMES DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interm. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 5,2 | 2,1 | 0,4 | 2,7 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 57 | 8,7 (4,9) | 3,6 (2,0) | 0,6 (0,3) | 4,5 (2,6) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 43 | 0,6 (0,3) | 0,2 (0,1) | 0,1 (0,1) | 0,3 (0,1) |
| Concrétions > 2 mm | 20 | 36,8 | 27,0 | 2,4 | 7,4 |

3.2.3. Comparaison entre HY 2 et HY 6

Le sol ocre et le sol rouge dérivent de la même embréchite, mais ils diffèrent par leur degré d'évolution : en HY 2 qui est peu évolué, le fer a été concentré par une accumulation relative, tandis qu'il est d'accumulation absolue dans HY 6, sol très évolué. Les différences d'évolution sont soulignées par le rapport minéraux légers sur minéraux lourds, qui est de $24\%/2,5\% = 10$ dans le premier, et $4,9\%/0,06\% = 80$ dans le second. Le fer apparaît mieux cristallisé dans les sables et les concrétions du sol le plus évolué, c'est-à-dire là où il a été apporté en solution. Au contraire, le fer sous forme amorphe se concentre dans les pseudo-sables (fraction argile) du sol le plus évolué, et dans les sables et concrétions du sol ocre où il paraît protégé de la cristallisation et de l'entraînement :

| | HY 2 Pseudo-sables 9 % | | | | HY 6 Pseudo-sables 50 % | | | |
|--------------------------|------------------------|--------|--------|----------|-------------------------|--------|--------|----------|
| | Sol total | Argile | Sables | Concrét. | Sol total | Argile | Sables | Concrét. |
| Fer total | 11,3 | 10,5 | 12,4 | 54 | 13,8 | 13,9 | 12,5 | 55 |
| Fer « amorphe » ... | 5,1 | 4,2 | 6,4 | 36 | 7,5 | 7,9 | 3,4 | 9,2 |
| Fer amorphe/total .. | 4,5/10 | 4/10 | 5/10 | 7/10 | 5,5/10 | 6/10 | 3/10 | 2/10 |
| % d'extraction | 75 | 90 | 100 | 88 | 88 | 90 | 75 | 75 |

3.2.4. Comparaison entre les sols rouge, ocre et jaune ferrallitiques

Relativement au matériau qui leur a donné naissance, les sols rouges étudiés contiennent plus de fer total et de fer sous forme amorphe (hydroxydes hydratés) que le sol ocre et surtout que le sol jaune.

Les sols rouges étudiés sont plus argileux que les sols ocre et jaune, et contiennent plus de pseudo-particules résistant au pyro-phosphate dans la fraction sable : 60 % en NGD 256, 50 % en HY 6, 9 % en HY 2 et 4 % en KOM 4. Dans cette étude, ces pseudo-particules sont incluses dans la fraction argile.

Dans les quatre sols étudiés, le fer total et le fer sous forme amorphe sont associés en proportions peu différentes aux fractions argile et sables exception faite :

- des sables du sol rouge sur basalte qui en contiennent deux fois plus ;
- des sables du sol jaune qui en contiennent dix fois moins.

Ainsi, dans le premier où le fer, très abondant, paraît libéré sur place, ce fer s'associe préférentiellement à la fraction sable, tandis que, dans le second, très appauvri en fer, celui-ci ne s'est pas associé à cette fraction ou plutôt en a été éliminé par lessivage. Ces faits amènent à supposer que le sol jaune étudié a été fortement lessivé en fer et que c'est le fer de la fraction sable qui s'avère alors le plus vulnérable. Une grande propreté des sables grossiers apparaît d'ailleurs à l'examen morphologique.

Les deux sols rouges diffèrent entre eux par la teneur en fer de la fraction sable et le degré de cristallinité de celui-ci. Ces faits amènent à penser que le fer libéré sur place reste sous forme amorphe et s'associe de préférence à cette fraction (sables vrais et pseudo-sables), tandis que le fer apporté en solution s'individualise sous forme de concrétions mieux cristallisées.

Ces résultats indiquent que la fraction qui présente des variations significatives des teneurs en fer total et fer de forme amorphe est la fraction sables. C'est donc sur cette fraction qu'il est intéressant de doser fer total et fer de forme amorphe.

Pour les sols étudiés, on aboutit aux conclusions suivantes :

— Le taux de fer sous forme amorphe relativement au taux de fer total varie beaucoup moins dans la fraction argile que dans la fraction sable.

— Plus le sol est jaune, moins sa fraction sable contient de fer total relativement au matériau originel et de fer sous forme amorphe.

— Le fer libéré sur place reste sous forme amorphe à l'état de sables, pseudo-sables et concrétions.

— Le fer d'apport absolu tend à cristalliser sous forme de concrétions.

Dans le sol total, le rapport fer de forme amorphe sur fer total diminue des sols rouges vers le sol jaune, ce qui va dans le sens des observations de SEGALEN au sujet de l'influence des formes amorphes du fer sur la couleur du sol.

| Sols rouges | | Ocre | Jaune |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|
| NGD 256 84 % | HY 6 55 % | HY 2 45 % | KOM 4 40 % |

Dans les concrétions, ce rapport est plus élevé, (sauf en HY 6) ce qui amène deux remarques :

| | | | |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|
| NGD 256 65 % | HY 6 17 % | HY 2 68 % | KOM 4 73 % |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|

— Le fer sous forme amorphe piégé dans les concrétions est peu vulnérable.

— Les horizons concrétionnés des sols rouges ne se distinguent pas fondamentalement de ceux des sols jaunes ; la nature absolue ou relative de l'accumulation du fer joue au contraire un rôle prépondérant.

Un même nombre de traitements Ségalen a abouti dans les quatre profils à l'extraction des pourcentages de fer suivants :

| Profils | NGD 256 | HY 6 | HY 2 | KOM 4 |
|-----------------------|---------|------|------|-------|
| Sol total (%) | 99 | 90 | 75 | 65 |
| Concrétions (%) | 100 | 75 | 90 | 90 |

D'après ces exemples, plus le sol est jaune, plus le fer de ses fractions fines résiste au traitement Segalen et donc plus son degré de cristallinité peut y être considéré comme élevé. Le fer des concrétions présente au contraire partout un degré de cristallinité médiocre, meilleur toutefois dans l'accumulation absolue de HY 6.

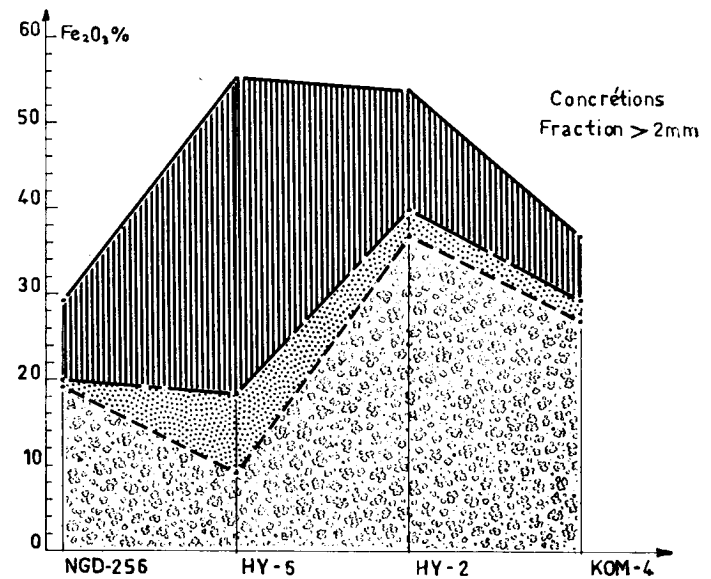
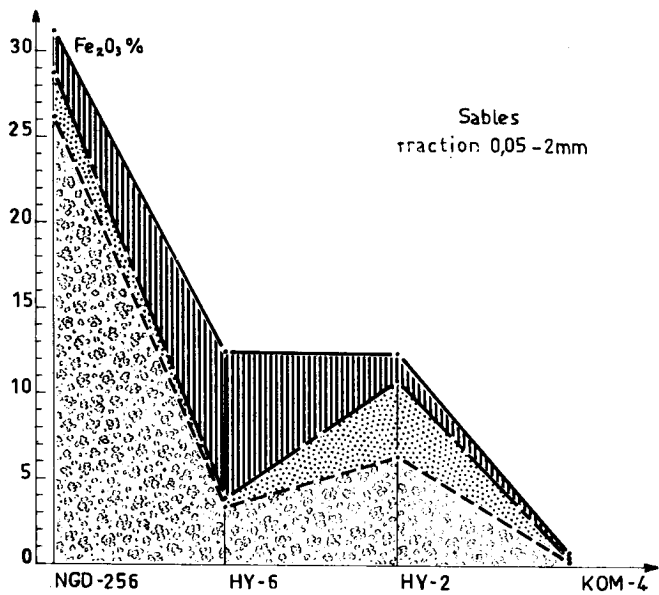
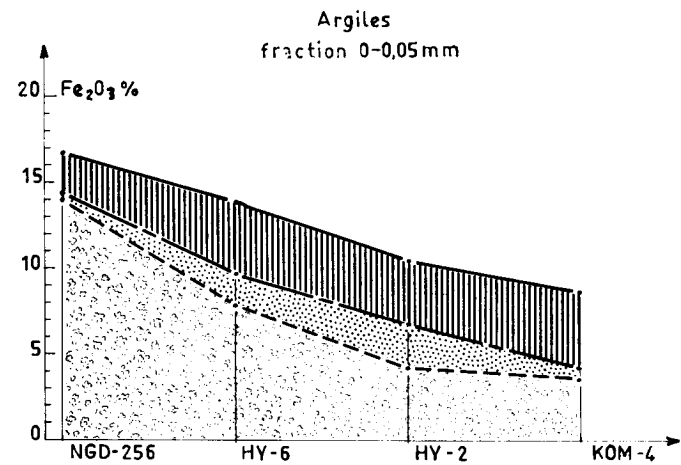
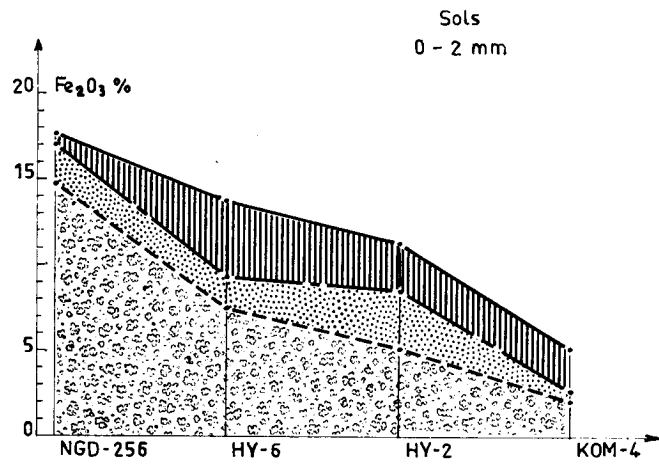


FIG. 7.

Les quatre tableaux de la planche ci-contre schématisent ces formes du fer dans le sol total et ses trois fractions, en allant des sols rouges vers le sol jaune. On remarque que, dans le sol total et la fraction argile, la teneur en formes amorphes de fer diminue des sols rouges vers les sols clairs, tandis que la teneur en formes cristallisées varie peu. Les fractions sables et concrétions, par contre, varient différemment en relation avec l'héritage de la roche mère ou le type d'accumulation des composés du fer.

3.3. LES FORMES DU FER DANS UN SOL FERRUGINEUX ET DEUX SOLS ROUGES TROPICAUX

3.3.1. Dans le sol total

Le sol ferrugineux tropical TOU 4 dérive d'un granite calco-alcalin dont l'altération présente une teneur en fer de 4,4 %. Il contient 4,7 % de fer total, dont 1/3 est sous forme amorphe. Ce sol est moyennement pourvu en éléments traces métalliques ($\Sigma M = 1,5$ millimoles %). La composition minéralogique de la fraction fine est : kaolinite, un peu de gibbsite, de goëthite, d'hématite et de fer sous forme amorphe. La séparation au bromoforme distingue 38 % de quartz et feldspaths, pour 0,13 % seulement de minéraux lourds.

Ce sol contient 11 % de pseudo-sables résistant au pyro-phosphate. La densité apparente de ce type de sols est assez élevée : 1,6 à 1,7.

Le sol rouge tropical BBH 203 dérive d'un micaschiste contenant 9 % de fer dans son altération. Il contient 11 % de fer total dont plus de la moitié est sous forme amorphe. La composition minéralogique de la fraction fine est : un mélange (3/1) d'illite et montmorillonite, et des hydroxydes hydratés du fer, goëthite et hématite. Ce sol contient 31 % de pseudo-sables et il est bien pourvu en éléments traces métalliques ($\Sigma M = 3,2$ millimoles %). La densité apparente hors cailloux de ce type de sol est assez faible (1,25 à 1,50).

Le sol rouge tropical HUM 3 dérive d'une roche basique verte présentant 15 % de fer dans son altération. Il contient 20 % de fer total, dont plus de la moitié est sous forme amorphe. La composition minéralogique de la fraction fine est : un mélange (3/1) d'illite et montmorillonite, de la kaolinite (?), plus de l'hématite, de la goëthite et des hydroxydes hydratés de fer. Ce sol contient 29 % de pseudo-sables. Sa densité apparente est 1,25 hors cailloux en B.

Dans le sol ferrugineux tropical caractérisé par une grande labilité du fer, le taux de fer sous forme amorphe représente seulement 30 % du fer total. Dans les sols rouges tropicaux qui dérivent de roches riches en fer et où le fer est réputé d'accumulation relative, le taux de fer sous forme amorphe atteint 60 % du fer total.

3.3.2. Dans les différentes fractions

Examen des courbes d'extraction :

En *TOU 4*, les courbes d'extraction sont du type III (figure 5) pour les deux fractions et pour le sol total. La proportion de fer intermédiaire est importante, surtout dans la fraction argile.

4 heures de traitement Segalen ont extrait 70 % du fer dans le sol total, 75 % dans l'argile et 100 % dans les sables.

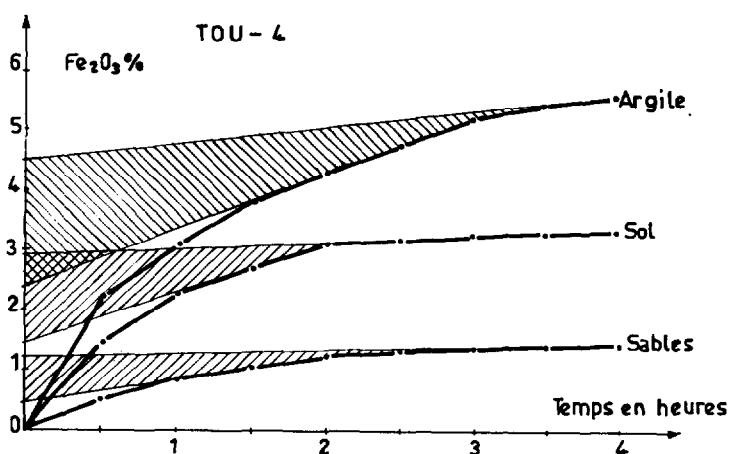


FIG. 5. — Courbes d'extraction TOU 4.

En *BBH 203*, les courbes sont aussi du type III (figure 6), mais on n'obtient de véritable alignement qu'au delà de 2 heures d'extraction, la partie antérieure présentant une faible courbure qui prête à discussion. Par analogie avec l'autre sol rouge tropical, on a considéré que la teneur en fer de forme amorphe était ici importante aux dépens du fer de forme intermédiaire.

4 heures de traitement Segalen ont extrait 66 % de fer dans le sol total, 70 % dans l'argile et 45 % dans les sables.

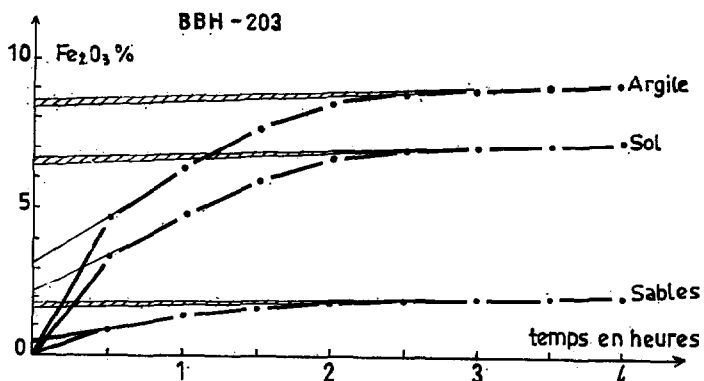


FIG. 6. — Courbes d'extraction BBH 203.

En *HUM 3*, les courbes sont du type IV (figure 7) pour le sol et la fraction sable, du type III pour la fraction argile. La teneur en fer de forme amorphe est très importante dans toutes les fractions.

4 heures de traitement Segalen ont extrait 80 % du fer dans le sol total et dans la fraction argile, 76 % dans les sables.

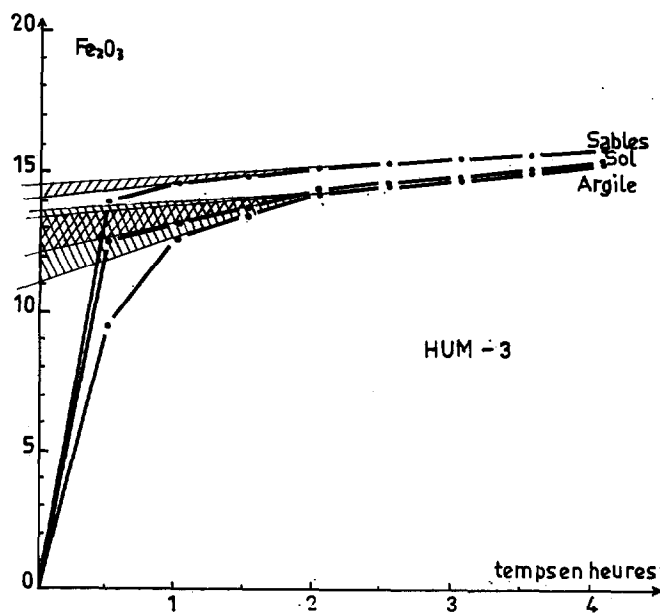


FIG. 7. — Courbes d'extraction HUM 3.

TENEURS DES DIFFÉRENTES FRACTIONS

En TOU 4 (tableau V), le fer total et les formes amorphes sont associés essentiellement à l'argile (4/5), tandis que la fraction sable qui en constitue la moitié est nettement appauvrie (1/5). Toutefois le rapport fer de forme amorphe/fer total est de 3/10 dans les deux cas.

TABLEAU V

PROFIL TOU 4. FORME DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|-----------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 4,7 | 1,5 | 1,5 | 1,7 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 55 | 7,3 (4,1) | 2,4 (1,3) | 2,1 (1,2) | 2,8 (1,6) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 45 | 1,4 (0,6) | 0,4 (0,2) | 0,8 (0,3) | 0,2 (0,1) |

En BBH 203 (tableau 6), le fer total et le fer sous forme amorphe sont plus associés à l'argile qu'aux sables. Le rapport fer de forme amorphe/fer total est de 6/10 dans l'argile et 4/10 dans le sable.

TABLEAU VI

PROFIL BBH 203. FORMES DE Fe₂O₃

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 11,2 | 6,4 | 0,2 | 4,6 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 72 | 13,8 (9,9) | 8,4 (6,0) | 0,2 (0,1) | 5,2 (3,8) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 28 | 4,5 (1,3) | 1,6 (0,4) | 0,2 (0,1) | 2,7 (0,8) |

En HUM 3 (tableau 7), le fer total et le fer de forme amorphe sont associés en quantités équivalentes aux argiles et aux sables. Le rapport fer de forme amorphe/fer total est de 6/10 dans l'argile et 7/10 dans les sables.

TABLEAU VII

PROFIL HUM 3. FORMES Fe₂O₃

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 20,1 | 12,1 | 1,5* | 6,5 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 65 | 19,3 (12,6) | 11,1 (7,2) | 2,3 (1,5) | 5,9 (3,9) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 35 | 21,4 (7,5) | 14,1 (4,9) | 0,5 (0,2) | 6,8 (2,4) |

La fraction sable apparaît ici comme la fraction présentant des variations importantes de teneurs en fer total et en formes amorphes de composés du fer.

3.3.3. Comparaison entre les deux sols rouges tropicaux

Le sol BBH 203 sur micaschiste est moins riche en fer total (11 %) et de forme amorphe (6 %) que le sol HUM 3 sur roche verte (20 % et 12 %).

L'un dérive d'une roche à sables quartzeux, l'autre d'une roche basique riche en fer, d'origine vulcano-métamorphique. Les taux de fer sous forme amorphe relativement au fer total sont équivalents (6/10) dans le sol total et dans la fraction argile. Leurs teneurs en pseudo-sables sont presque égales (29 et 31 %).

Ces sols se distinguent cependant par les teneurs en fer dans la fraction sable : les sables de BBH 203 ne contiennent que 4,5 % de fer total dont 1/3 est sous forme amorphe ; ceux de HUM 3 au contraire en contiennent 21,5 %, dont les 2/3 sont sous forme amorphe. Dans le premier cas, les sables sont 3 fois

moins riches que l'argile en fer total (et 5 fois moins en formes amorphes) ; dans l'autre, ils sont au contraire un peu plus riches (1,1 et 1,3 fois) Peu ou pas de fer sous forme intermédiaire en BBH 203, alors qu'il est présent en HUM. 3

L'héritage de la roche mère paraît donc marquer son influence sur la fraction sable.

3.3.4. Comparaison entre les différents sols à sesquioxydes

Les teneurs en pseudo-sables des différents sols à sesquioxydes étudiés décroissent dans l'ordre : sol rouges ferrallitiques, sols rouges tropicaux, sol ocre et jaune ferrallitiques, sol ferrugineux. Dans le même sens décroissent les teneurs en fer de forme amorphe et les rapports Fe de forme amorphe/Fe total. Les sols ferrallitiques et fersiallitiques ont tous des teneurs en fer de forme amorphe importantes dans la fraction fine.

D'une façon générale, les sols rouges sont plus riches en fer sous forme amorphe et en pseudo-particules que les sols clairs.

| Fraction argile | NGD 256 | HY 6 | BBH 203 | HUM 3 | HY 2 | KOM 4 | TOU 4 |
|-------------------------|---------|------|---------|-------|------|-------|-------|
| Fer amorphe (%) | 14 | 7,9 | 8,4 | 11,1 | 4,2 | 3,6 | 2,4 |
| Fer amorphe/total | 8/10 | 6/10 | 6/10 | 6/10 | 4/10 | 3/10 | 3/10 |
| Pseudo-sables (%) | 60 | 50 | 31 | 29 | 9 | 4 | 11 |

Les sols rouges tropicaux contiennent dans chaque fraction plus de fer total que le sol ferrugineux étudié et le rapport fer de forme amorphe/fer total y atteint 2/3, ce qui rapproche encore ces sols rouges fersiallitiques des sols rouges ferrallitiques. Ce rapport n'est que de 1/3 dans le sol ferrugineux tropical, dont la fraction sable se révèle lessivée en fer comme dans le sol ferrallitique jaune KOM 4.

Ces résultats sont en faveur d'une relation entre la couleur rouge, une forte teneur en fer total relative-ment à la roche, une forte proportion de fer sous forme amorphe, une faible densité apparente et la présence de pseudo-sables.

| Type de sol | Sols rouges | | | | Sol ocre | | Sols clairs | | | |
|------------------------------------|---------------|-------|----------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|----------------|-------|
| | ferrallitique | | fersiallitique | | ferrallitique | | ferrallitique | | fersiallitique | |
| Fraction | Sable | Total | Sable | Total | Sable | Total | Sable | Total | Sable | Total |
| Fer amorphe | 26 | 15 | 14 | 12 | 6 | 5 | 0,2 | 2,1 | 0,4 | 1,5 |
| Fer total | 32 | 18 | 21 | 20 | 12 | 11 | 0,6 | 5,2 | 1,4 | 4,7 |
| Rapport | 8/10 | 8/10 | 6/10 | 6/10 | 5/10 | 5/10 | 3/10 | 4/10 | 3/10 | 3/10 |
| Elément traces en millimoles % ... | 2 à 5 | | 3 | | 0,8 à 1,5 | | 0,3 à 0,8 | | 0,5 à 1,0 | |
| Densité apparente . | 0,9 à 1,3 | | 1,25 à 1,50 | | — | | 1,4 à 1,5 | | 1,6 à 1,7 | |

Par ailleurs, les sols ferrallitiques jaunes et les sols ferrugineux tropicaux se sont montrés pauvres en éléments traces métalliques, alors que les sols rouges ferrallitiques et fersiallitiques en sont bien pourvus (NALOVIC, 1970).

3.4. LES FORMES DU FER DANS UN VERTISOL

3.4.1. Dans le sol total

Le vertisol BBH 202 dérive de la même roche que BBH 203, un micaschiste présentant 10 % de fer dans son altération. Il contient 12 % de fer total dont les 4/10 sont sous forme amorphe.

La composition minéralogique de la fraction fine est : un mélange 4/1 de montmorillonite et illite, et un peu d'hydroxydes hydratés de fer, de goëthite et d'hématite.

Ce sol contient 3,4 millimoles % d'éléments traces métalliques. La densité apparente des vertisols est assez élevée (1,6 à 1,8), nettement plus que celle des sols rouges tropicaux (hors cailloux).

3.4.2. Dans les différentes fractions

Les courbes d'extraction (figure 8) sont du type III, avec diminution rapide de la pente d'où relativement peu de fer sous forme amorphe (5 %), et très peu de fer de forme intermédiaire (0,5 %).

4 heures de traitement Segalen ont extrait 58 % du fer total, 67 % de l'argile et 50 % de la fraction sables.

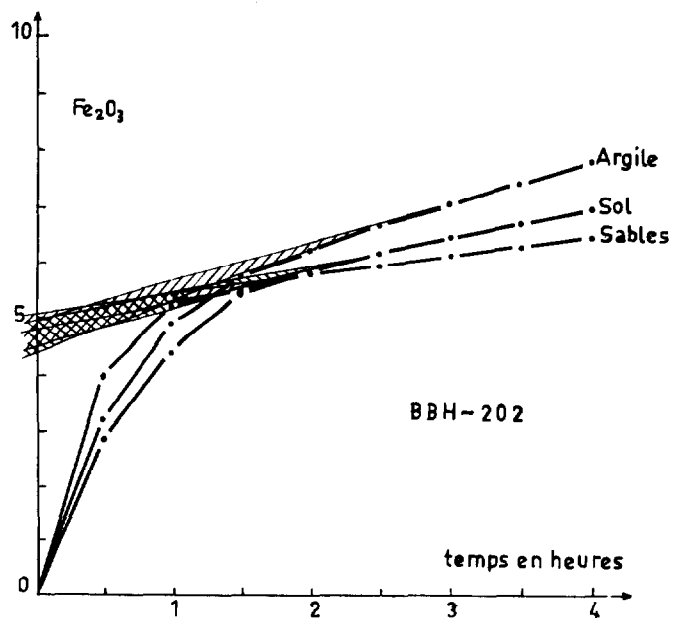


FIG. 8. — Courbes d'extraction BBH 202.

Le fer total et le fer de forme amorphe de ce sol (tableau 8) sont associés en quantités comparables aux fractions sables et argile.

TABLEAU VIII

PROFIL BBH 202. FORMES DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 11,9 | 4,5 | 0,5 | 6,9 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 72,6 | 11,5 (8,3) | 4,4 (3,2) | 0,6 (0,4) | 6,5 (4,7) |
| Sables 0,05 - 2 mm | 27,4 | 13,2 (3,6) | 4,8 (1,3) | 0,3 (0,1) | 8,1 (2,2) |

3.4.3. Comparaison avec le sol rouge tropical de la séquence

Le vertisol contient la même quantité de fer total (12 %) que le sol rouge tropical auquel il est associé topographiquement, et ce fer y est également associé à toutes les fractions. La proportion de fer sous forme amorphe y est cependant plus faible :

| Fraction | Sol rouge tropical | | | Vertisol | | |
|----------------|--------------------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| | Fer total | Fer « amorphe » | Rapport | Fer total | Fer « amorphe » | Rapport |
| Sol | 11 | 6 | 5/10 | 12 | 4,5 | 4/10 |
| Argile | 14 | 8 | 6/10 | 11 | 4,5 | 4/10 |
| Sable | 4 | 1,6 | 3/10 | 13 | 4,8 | 4/10 |

Le même nombre de traitements Segalen extrait 70 % du fer présent dans le sol total et la fraction argile des deux sols, et seulement 50 % dans la fraction sable où le fer apparaît donc mieux cristallisé (1/3 d'amorphe seulement).

La séparation au bromoforme indique dans la fraction sable (50-2 000 μ) du sol rouge tropical 13 % de minéraux légers et 4 % de minéraux lourds. Ces pourcentages sont différents dans le vertisol : 9 % et 8 %.

Donc dans cette séquence topographique, sur même roche mère, le sol rouge tropical de sommet est aussi riche en fer que le vertisol de bas de pente, mais la proportion du fer sous forme amorphe y est plus élevée (sauf dans les sables).

La couleur rouge apparaît ici encore coïncider avec une proportion importante de produits ferrugineux amorphes.

Le fer du vertisol n'a pas été exporté, et il en est de même des éléments traces métalliques qui y sont aussi abondants que dans le sol rouge tropical. L'évolution verticale n'a pas modifié la teneur globale en fer et en éléments traces métalliques, mais elle a augmenté la densité apparente, et elle amène une partie du fer à quitter la forme amorphe (ou bien le rend moins accessible au traitement Segalen).

3.5. LES FORMES DU FER DANS DEUX SOLS BRUNS EUTROPHES

3.5.1. Dans le sol total

NGD 266 sur basalte contient 17,5 % de fer total, dont les 2/10 seulement sont sous forme amorphe, et presque autant sous forme intermédiaire. La teneur en fer total de l'altération est presque la même.

La composition minéralogique de la fraction fine est : kaolinite (+ +), hématite (+ +), gibbsite (+), hydroxydes hydratés du fer (+).

La séparation au bromoforme donne 7,6 % de minéraux légers et 2,5 % de minéraux lourds (rapport MI/ML = 3).

NGD 380 sur gabbro contient 24 % de fer total, dont les 7/10 sont sous forme amorphe (peu de fer intermédiaire). La teneur en fer total est identique dans l'altération.

La composition minéralogique de la fraction fine est : kaolinite (+), gibbsite (+ +), hydroxydes hydratés du fer (+ +) et un peu d'hématite.

La séparation au bromoforme donne : 4,6 % de minéraux légers et 2,8 % de minéraux lourds (rapport MI/ML = 1,6).

Des sols analogues de la région se sont montrés très riches en éléments traces métalliques ($\Sigma M = 5$ à 8 millimoles %).

La densité apparente de la matière fine de sols comparables est très faible ($d = 1,0$), mais la présence de nombreux cailloux augmente irrégulièrement la densité apparente globale.

3.5.2. Dans les différentes fractions

Examen des courbes d'extraction

En NGD 266 (figure 9), les courbes d'extraction sont du type III et présentent des changements de pente nets. En NGD 380 (figure 10), les courbes sont également du type III sauf pour la fraction sable (type IV).

4 heures de traitement Segalen ont permis d'extraire 56 % du fer du sol total en NGD 266, mais 45 % dans les argiles et 65 % dans les sables. En NGD 380, 85 % ont été extraits du sol total, 80 % dans la fraction argile et 92 % dans la fraction sable.

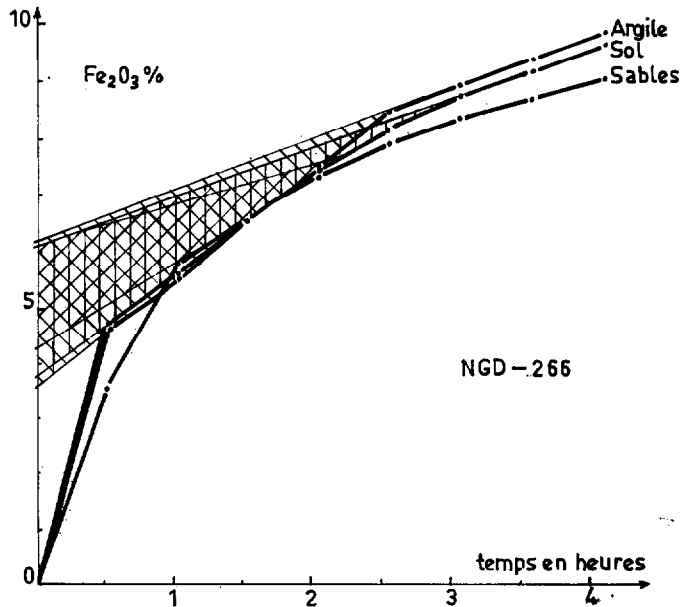


FIG. 9. — Courbes d'extraction NGD 266.

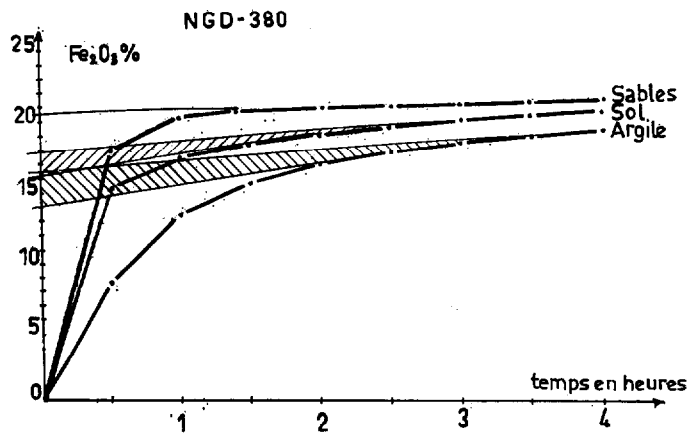


FIG. 13. — Courbes d'extraction NGD 380.

TENEURS DES DIFFÉRENTES FRACTIONS

En NGD 266 (tableau 9), la fraction argile contient plus de fer total (18,5 %) que la fraction sable (14,5 %), mais le rapport fer de forme amorphe/fer total y est moins élevé (2/10 pour les sables). Les teneurs en fer de forme intermédiaire sont élevées, de l'ordre de 15 %.

TABLEAU IX

PROFIL NGD 266. FORMES DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 17,5 | 3,8 | 2,4 | 11,3 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 72 | 18,6 (13,4) | 3,6 (2,6) | 2,6 (1,9) | 12,4 (8,9) |
| Sable 0,05 - 2 mm | 28 | 14,5 (4,1) | 4,3 (1,2) | 1,8 (0,5) | 8,4 (2,4) |

En NGD 380 (tableau 10), le fer total est mieux réparti entre les fractions, mais le rapport fer de forme amorphe/fer total est également moins élevé dans l'argile (6/10) que dans les sables (8,5/10). Pas de fer de forme intermédiaire dans les sables.

TABLEAU X

PROFIL NGD 380. FORMES DE Fe_2O_3

| Fraction étudiée | | Fer total | Fer « amorphe » | Fer « interméd. » | Fer « cristal. » |
|--------------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Sol total 0 - 2 mm | (%) 100 | 24,0 | 16,0 | 1,6 | 6,4 |
| Argile 0 - 0,05 mm | 69 | 24,2 (16,7) | 14,0 (9,7) | 2,3 (1,6) | 7,9 (5,4) |
| Sable 0,05 - 2 mm | 31 | 23,5 (7,3) | 20,3 (6,3) | 0 | 3,2 (1,0) |

3.5.3. Comparaison entre les deux sols

Les deux sols bruns étudiés sont voisins dans le paysage. L'un dérive d'une roche cristalline, un gabbro, l'autre d'une roche microlitique, un basalte qui est l'équivalent du gabbro par sa composition chimique (moins de fer cependant). On remarque que le sol formé sur la roche cristalline contient nettement plus de fer sous forme amorphe que le sol formé sur roche microlitique.

Ce n'est donc pas le degré de cristallinité de la roche mère qui détermine le taux de formes amorphes du fer produit ou libéré.

Or les deux sols se distinguent par leur degré d'évolution, le sol le plus évolué étant le plus riche en fer de forme amorphe.

L'évolution pédogénétique pourrait donc jouer un rôle déterminant pour la formation de formes amorphes du fer dans les sols dérivés de roches basiques.

| | Sol brun peu évolué NGD 266 | | | Sol brun ferruginisé NGD 380 | | |
|--------------------------------|-----------------------------|--------|-------|------------------------------|--------|--------|
| Pseudo-sables (%) | 40 | | | 30 | | |
| Rapport Ml/ML | 3 | | | 1,5 | | |
| Fraction | Sol total | Argile | Sable | Sol total | Argile | Sable |
| Fer « amorphe » | 3,8 | 3,6 | 4,3 | 16,0 | 14,0 | 20,3 |
| Fer amorphe/total | 2/10 | 2/10 | 2/10 | 7/10 | 6/10 | 8,5/10 |
| Pourcentage d'extraction | 56 | 45 | 65 | 85 | 80 | 92 |

En effet le taux relatif de formes amorphes du fer augmente encore dans le sol ferrallitique sur basalte, NGD 256, situé à proximité des sols étudiés :

| | NGD 266 | | NGD 256 | |
|-------------------------|------------|--------------|------------|--------------|
| Sables vrais (%) | 30 | | 6 | |
| Pseudo-sables (%) | 40 | | 60 | |
| Fraction | Sol Totale | Sables vrais | Sol Totale | Sables vrais |
| Fer total | 17,5 | 14,5 | 17,7 | 31,6 |
| Fer « amorphe » | 3,8 | 4,3 | 14,8 | 26,6 |
| Fer amorphe/total | 2/10 | 3/10 | 8/10 | 8,5/10 |

On constate, en comparant les deux sols sur basalte, l'un NGD 266 Brun peu évolué, l'autre NGD 256, ferrallitique rouge, qu'avec l'évolution pédologique le taux de sables vrais a diminué tandis que le taux de pseudo-sables augmentait et avec lui la teneur en fer de forme amorphe. Cette évolution est surtout marquée sur la fraction sable qui se révèle encore une fois, comme la fraction significative.

3.6. STRUCTURE ET ÉVOLUTION DES PSEUDO-SABLES

Les sables vrais et les pseudo-sables de NGD 266, sol jeune, et de NGD 256, sol évolué étudié au chapitre III 14, ont été soumis au traitement alterné Segalen pour l'extraction des formes amorphes du fer et de l'alumine sans avoir été au préalable broyés à 200 μ . Les courbes cumulatives obtenues ainsi diffèrent nettement de celles obtenues après broyage. En particulier dans les pseudo-sables des deux sols,

la courbe d'extraction (figure 11) de l'alumine présente une concavité entre une heure et trois heures de traitement. Cette inflexion est moins marquée dans la courbe d'extraction du fer des pseudo-sables du sol évolué. Ce ralentissement de solubilité au traitement alterné acide et basique pourrait être dû à une disposition particulière, au sein des pseudo-sables, des composés du fer et de l'alumine, ou à leur degré de solubilité.

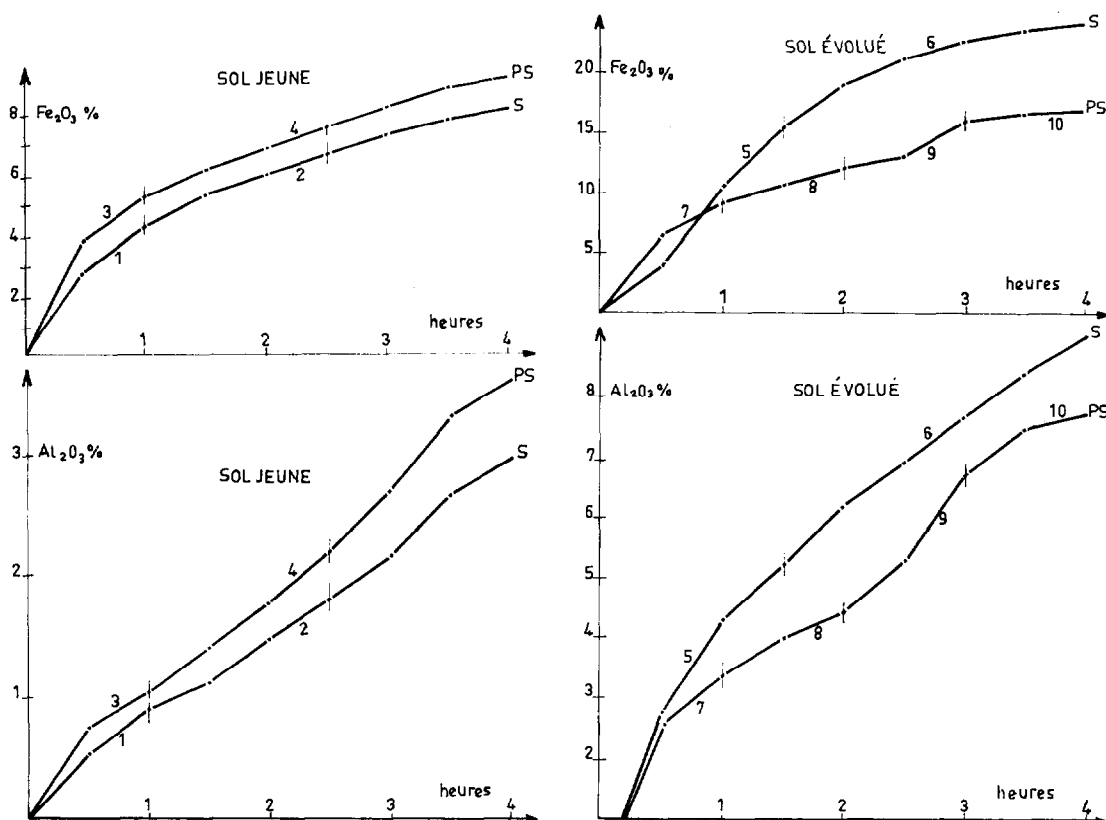


FIG. 11.

Ces variations de solubilité peuvent s'expliquer si l'on admet que les particules étudiées présentent une structure en couches concentriques attaquées successivement par les réactifs et qui diffèrent, soit par les formes de fer et d'alumine qu'elles contiennent, soit par leurs proportions relatives, soit par leur disposition. L'examen à la binoculaire des particules brisées confirme l'existence d'une cuticule autour des sables mais ne révèle pas de structure concentrique pour les pseudo-sables : il est donc possible que la disposition concentrique supposée concerne non pas les pseudo-sables vus à la binoculaire, mais des particules plus petites cimentées entre elles pour former les pseudo-sables observés. Une étude fine de ces micropeds est en cours.

4. DISCUSSION

4.1. CHOIX DES PROFILS

Les profils étudiés ont été choisis de manière à éclairer certains problèmes concernant les formes du fer dans les sols, notamment : les rôles respectifs de la roche-mère et de la pédogénèse, l'origine des formes amorphes de composés du fer, leur stabilité dans le temps et enfin leur comportement dans le paysage.

C'est ainsi que les trois sols NGD 266-380 et 256, situés dans la même région et qui dérivent de roches basiques riches en fer, forment une séquence évolutive du sol brun peu évolué au sol rouge ferrallitique fortement désaturé par l'intermédiaire d'un sol brun ferruginisé.

Ces deux sols bruns NGD 380 et 266, dérivés l'un d'un gabbro, l'autre d'un basalte qui est l'équivalent microlitique du gabbro, diffèrent par le degré de cristallinité de leur roche-mère.

Les deux sols rouges tropicaux BBH 203 et HUM 3, de même degré d'évolution, dérivant l'un d'un micaschiste, l'autre d'une roche basique vulcano-métamorphique dépourvue de sables quartzeux, permettent d'étudier également l'influence de la roche.

La séquence topographique BBH 203-202 permet au contraire de comparer deux pédogénèses imprimées dans la même roche-mère (micaschiste) pour donner un sol rouge tropical en position haute, un vertisol en bas de pente.

Les deux sols HY 2 et HY 6 représentent la même séquence topographique mais le premier caractérise les fortes pentes constamment rajeunies par l'érosion d'un inselberg, le second les sols concrétionnés et évolués des flancs d'un interfluve.

Les deux sols rouges ferrallitiques NGD 256 et HY 6 diffèrent par le mode d'accumulation du fer, d'origine relative dans le premier, absolue dans le second.

Enfin de NGD 256 à KOM 4 par HY 6 et HY 2, on obtient une séquence climatique des sols rouges vers les sols jaunes ferrallitiques.

4.2. ROLES RESPECTIFS DE LA ROCHE-MÈRE ET DE LA PÉDOGÉNÈSE

Les deux sols bruns étudiés diffèrent à la fois par le degré de cristallinité de la roche-mère qui leur a donné naissance (basalte et gabbro) et par leur degré d'évolution (brun peu évolué et brun ferruginisé). Or, on constate que c'est le sol dérivé de la roche cristalline qui fournit le plus fort pourcentage absolu et relatif de composés du fer sous forme amorphe. Le degré d'évolution plus poussé de ce sol peut alors être mis en cause. En effet, dans un sol encore plus évolué (ferrallitique fortement désaturé), ce taux de formes amorphes de composés du fer augmente encore jusqu'à constituer les 8/10 du fer total.

Il semble que ce ne soit pas le degré de cristallinité des minéraux ferrifères de la roche-mère qui détermine le taux de forme amorphe de composés du fer dans le sol mais l'intervention d'un facteur de désordre cristallographique, déclenché par l'altération et qui persiste même dans un sol ferrallitique dépourvu d'anions

et fortement lixivié en cations alcalins et alcalino-terreux. Ne serait-ce donc pas dans les niveaux d'altération voire même dans la roche, qu'il faudrait rechercher ce facteur inhibiteur et étudier les différentes formes du fer afin de saisir dès le début la genèse de ces produits amorphes ?

Les deux sols rouges tropicaux comparés présentent le même taux de formes amorphes de composés du fer relativement au fer total, mais ils se distinguent par la fraction sable qui traduit précisément l'influence de la roche-mère : le sol qui a hérité de sables quartzeux contient moins de pseudo-sables et moins de fer sous forme amorphe et fer total lié à cette fraction que l'autre sol où cette fraction et au contraire un peu enrichie.

Ces exemples montrent que c'est dans la fraction sables que les différentes formes de composés du fer présentent les variations les plus intéressantes et renseignent à la fois sur l'héritage de la roche-mère et sur l'évolution pédogénétique du milieu.

4.3. COMPORTEMENT DANS LE PAYSAGE

Le sol ferrallitique HY 6 qui réalise une importante concentration absolue de fer se distingue des sols HY 2 et NGD 256 où le fer provient principalement d'une concentration sur place.

Le fer apporté en solution a tendance à cristalliser sous forme de concrétions, tandis que le fer libéré sur place reste piégé sous forme amorphe dans des pseudo-sables et des concrétions où il est relativement protégé.

Cette différence de comportement du fer libéré en place et du fer transporté en solution se retrouve entre sols rouges tropicaux et sol ferrugineux tropical : le taux relatif de fer sous forme amorphe est en effet deux fois plus élevé dans les sols rouges tropicaux qui se rapprochent à ce point de vue des sols rouges ferrallitiques.

Inversement, les sols clairs (sol ferrugineux beige et sol ferrallitique jaune) portent dans leur fraction sable la marque d'un lessivage du fer (relativement à leur matériau).

L'étude des différentes formes du fer dans les sols à sesquioxides conduit à rapprocher les sols rouges ferrallitiques des sols rouges fersiallitiques qui possèdent en commun, outre la couleur rouge :

- *une teneur élevée en fer total relativement à la roche,*
- *une forte proportion de composés du fer sous forme amorphe,*
- *une teneur élevée en éléments traces métaux lourds,*
- *une faible densité apparente de la matrice,*
- *un pourcentage important de pseudo-sables.*

Inversement, les sols jaunes ferrallitiques et le sol ferrugineux tropical lessivé se rapprochent par :

- *le lessivage de leur fer,*
- *une faible proportion de composés du fer sous forme amorphe notamment dans la fraction sable,*
- *peu d'éléments traces métaux lourds,*
- *une densité apparente moyenne à forte,*
- *peu ou pas de pseudo-sables.*

4.4. STABILITÉ DANS LE TEMPS

La teneur en forme amorphe de composés du fer, faible dans les sols peu évolués augmente fortement jusqu'au stade rouge ferrallitique ou rouge tropical, et reste stable dans des conditions de bon drainage. L'intervention de conditions hydriques défavorables, liées à un climat plus humide (domaine des sols jaunes ferrallitiques) ou d'un pédo-climat plus humide (sols jaunes de bas de pente, sols ferrugineux tropicaux) a pour effet de lessiver le fer, lessivage qui affecte principalement la forme amorphe et plus spécialement la fraction sable. A noter toutefois qu'une forme amorphe de composés du fer subsiste même dans l'argile des sols lessivés étudiés.

CONCLUSION

L'étude des formes du fer dans les sols par la méthode préconisée par SÉGALEN et appliquée à différentes fractions granulométriques séparées mécaniquement a donné les résultats suivants :

Dans la classe des sols à sesquioxydes, les sols rouges ferrallitiques et les sols rouges tropicaux présentent, sur le sol total, un rapport fer de forme amorphe-fer total élevé (0,6 à 0,8). Ces sols contiennent également de fortes teneurs en pseudo-sables et en éléments traces métalliques ; leur densité apparente est faible (0,9 à 1,3). Au contraire ce rapport est bas dans le sol jaune ferrallitique et le sol ferrugineux (0,3 à 0,4), qui sont par ailleurs pauvres en pseudo-sables et en éléments traces métalliques et de densité apparente plus élevée (1,4 à 1,7). Il existe donc peut-être une relation entre certains des caractères suivants : couleur rouge, forte teneur relative en formes amorphes de composés du fer et éléments traces métalliques, abondance des pseudo-sables et densité apparente faible.

Le rapport fer de forme amorphe/fer total augmente dans l'ordre sol peu évolué, sol brun, sols rouges ferrallitiques et fersallitiques, où il est maximum, puis décroît là où le fer paraît avoir subi un transport en solution (sols lessivés).

Dans la fraction 0-50 μ qui englobe la matière fine des pseudo-sables, le fer sous forme amorphe est abondant et ses variations d'un type de sol à l'autre sont moins significatives que celles du sol total

Par contre, dans la fraction sables vrais 50-2 000 μ , le rapport fer de forme amorphe/fer total paraît renseigner à la fois sur le transport du fer et sur l'héritage de la roche-mère : il est relativement bas dans le sol jaune ferrallitique et le sol ferrugineux qui sont appauvris en fer, ainsi que dans l'accumulation absolue du sol rouge de Yaoundé. Il est plus bas aussi dans le sol brun qui est peu évolué et dans le sol rouge tropical qui dérive d'une roche quartzreuse.

Dans la fraction concrétions, il est toujours élevé sauf pour le fer d'apport absolu du sol de Yaoundé. Le fer sous forme amorphe, piégé et protégé dans ces fractions grossières, pourrait renseigner sur les conditions régnant lors de concrétionnement.

La méthode d'extraction alternée préconisée par SÉGALEN permet de distinguer la forme amorphe de composés du fer et pourrait même renseigner sur les teneurs des différentes espèces cristallines à conditions de mener l'opération jusqu'à épuisement du fer disponible. En dosant simultanément alumine et silice, elle indique également les relations entre les différents minéraux amorphes présents.

La méthode Segalen appuyée par l'analyse thermique différentielle a été appliquée également à des fractions non broyées, sables et pseudo-sables, de deux sols sur basalte différant par leur degré d'évolution. L'aspect particulier des courbes obtenues sur ces fractions intactes pourrait s'expliquer par une structure complexe de ces particules, relativement au degré de cristallinité ou à l'accessibilité des composés du fer et de l'aluminium.

BIBLIOGRAPHIE

- DAVIDTZ (J.-C.), SUMNER (M.E.), 1965. — Brooked charges on clay minerals in subtropical soils. *J. Soil Sci.*, vol. 16, n° 2, pp. 270-274.
- DEB (B.C.), 1950. — Estimation of free iron oxides in soils and their removal. *J. Soil Sci.*, vol. 1, n° 2, pp. 212-220.
- DELVIGNE (J.), 1965. — Pédogénèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mém. ORSTOM*, n° 13, Paris, 177 p.
- DESHPANDE (T.L.), GREELAND (D.J.), QUIRK (J.-P.), 1968. — Charges in soil properties associated with the removal of iron and aluminium oxides. *J. Soil Sci.*, vol. 19, n° 1, pp. 109-122.
- D'HOORE (J.), 1954. — L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. I.N.E.A.C., *Publ. ser. sci.*, n° 62, Bruxelles, 132 p.
- FOLLETT (E.A.), 1965. — The retention of amorphous colloidal ferric hydroxide by kaolinites. *J. Soil Sci.*, vol. 16, n° 2, pp. 334-341.
- BRUGGENWERT (T.), GASTUCHE (M.C.), MORTLAND (M.M.), 1964. — Crystallization of mixed iron and aluminium gels. *Soil Sci.*, vol. 98, n° 5, pp. 281-289.
- GREELAND (D.J.), OADES (J.M.), SHERWIN (T.W.). — Electron-microscope observation of iron oxides in some red soils. *J. Soil Sci.*, vol. 19, n° 1, pp. 123-125.
- HERBILLON (A.I.), FRANKART (R.), VIELVOYE (L.), 1966. — Evolution des fractions argileuses dans une toposéquence du Burundi. *Pédologie*, XVI, 2, pp. 167-182.
- HERBILLON (A.J.), TRAN VINH AN (J.), 1969. — Heterogeneity of silicon-iron mixed hydroxides. *J. Soil Sci.*, vol. 20, n° 2, pp. 223-235.
- HUMBEL (F.X.), 1970. — Etude de la densité apparente mesurée in situ dans quelques sols du Cameroun. Centre ORSTOM de Yaoundé, 49 p. multigr.
- KAMOSHITA (Y.), YAMADA (Y.), 1956. — [The effect of free iron on soil colour. *J. Sci. Soil manure*, Tokyo], vol. 27, pp. 77-78.
- KOJIMA (M.), 1962. — [Relationship between soil color and iron minerals contained in the soil]. *J. Sci. Soil nature*, Tokyo, vol. 33, n° 6, pp. 311-316. (Abstr. cir Soil sci. pl. Nutr. 1962, vol. 8, pp. 254-255).
- KOJIMA (M.), KAWAGUCHI (K.), 1968. — Identification of free iron minerals in rusty mottles in paddy soils in Japan, *J. Sci. Soil Manure*, vol. 39, n° 7, pp. 349-353 (Abstr. in *Soil sci. pl. Nutr.*, 1969, vol. 15, p. 48).
- KORNAKOV (N.S.), RODE (Z.J.), 1928. — Constitution on natural iron oxide hydrates. *Z. anorg. Chem.*, 169, pp. 57-80.
- MACKENZIE (R.C.), MELDAU (R.), 1959. — The aging of sesquioxide gels. I. *Mineral. Mag.*, vol. 32, n° 245, pp. 153-165.
- NALOVIC (Lj.), 1970. — Etude spectrographique des éléments traces et leur distribution dans quelques types de sols du Cameroun Centre ORSTOM de Yaoundé, 26 p. multigr.
- NALOVIC (Lj.), 1970. — Caractère géochimique des sols tropicaux (non publié).
- SCHWERTMANN (U.), 1966. — Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide. *Nature*, vol. 212, pp. 645-646.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1, pp. 105-126.
- SEGALEN (P.), 1969. — Contribution à la connaissance de la couleur de sols à sesquioxides de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 2, pp. 225-236.
- SEGALEN (P.), 1971. — La détermination du fer libre dans les sols à sesqui-oxydes, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 1, (sous presse).
- SHRYGINA (E.A.), 1958. — Recherche sur le vieillissement des gels d'hydroxydes de Fe et Al par la méthode thermique. *Trudy Poch. Inst. Dokuch.*, n° 43, pp. 104-112.
- SOILEAU (J.-M.), Mc CRACKEN (R.J.), 1967. — Free iron and coloration in certain well-drained coastal plain soils in relation to their properties and classification. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 2, pp. 248-255.
- SYS (C.) et al., 1961. — La cartographie des sols du Congo. I.N.E.A.C. *Publ. sér. tech.*, n° 66, Bruxelles, 149 p.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations, étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Sci., Strasbourg, 272 p. multigr.
- TAYLOR (R.M.), GRALEY (A.M.), 1967. — The influence of ionic environment on the nature of iron oxides in soils. *J. Soil Sci.*, vol. 18, n° 2, pp. 341-348.