

# L'HORIZON DIAGNOSTIQUE PETROFERRIQUE

Dr. H. GHANEM \*

## Introduction

Le fer est l'un des éléments les plus fréquents dans la nature. Il existe dans tous les sols du monde sous diverses formes et en quantités variables. De ce fait, son étude dans les sols fut abordée par des centaines, sinon des milliers de pédologues. Dans sa revue bibliographique, SEGALIN (1964) situe les principales études ayant trait aux diverses formes d'accumulation du fer. Cette revue, quoique partielle, est satisfaisante si on y ajoute tous les auteurs ayant contribué à l'étude du fer d'un point de vue macro- et micromorphologique, notamment au cours de cette dernière décennie. Compte-tenu de la multitude des auteurs ayant étudié le fer dans les sols, nous nous limiterons donc, dans ce texte, à circonscrire les grandes lignes ayant

---

(\*) Extrait de la Thèse présentée par l'auteur à l'Université d'Etat de Gand (I.T.C.) — Belgique — 9 février 1978.

Docteur-ès-Sciences, Ingénieur Agronome (ENSAG), Pédologue (ORSTOM),  
Chef du Service d'Ecologie et de la Station Centrale de Cartographie  
des Sols DRA-RABAT.

trait à la morphologie des diverses formes d'accumulation de fer, à leur composition chimique et minéralogique et à leur origine.

Dans la région des Zaërs et ses bordures, les trois principaux types génétiques de sols dominants se caractérisent notamment par leur profil ferrugineux plus ou moins différencié. L'individualisation du fer est faible dans les Tirs ; elle est plus poussée dans les sols fersiallitiques où le fer libéré et oxydé est réparti uniformément, conférant aux sols leur coloration rouge particulière. L'individualisation et l'accumulation du fer dans les sols ferrugineux sont nettement plus intenses que dans les deux types génétiques précédents. Elles s'accompagnent de la ségrégation de la fraction colloïdale (argiles). Celles-ci migrent et s'accumulent entre autre en profondeur, alors que le fer oxydé s'accumule puis s'indure en surface, dans les horizons éluviaux dont la base évolue, avec le temps, en horizon pétroferrique plus ou moins différencié.

L'un des problèmes premiers que suscite l'accumulation du fer sous forme de concrétions porte sur l'origine autochtone ou allochtone de ces dernières. Dans le premier cas, les concrétions (sens large) résulteraient de leur formation « in situ » avec éventuellement, exportation des autres constituants des horizons concrétionnés (ou cuirassés). Dans le second cas, elles résulteraient de leur formation hors des solums.

D'après BREWER (1964, 1974), les glébules sesquioxydiques sont des unités tridimensionnelles réparties dans le fond matriciel et de forme ellipsoïde ou arrondie... leur morphologie, notamment leur taille et leur arrangement interne (internal fabric) est incompatible avec leur présence à l'intérieur des matériaux des sols.

Par contre, selon KUBIENA (1938, 1954), les concrétions sont « des invasions amygdaloïdes formées in situ ». De même RICE et LEVICK (1953), considéraient que les concrétions résultent de processus de croissance (accretion) par addition de matériaux frais (sesquioxides) à leurs parties extérieures, formées « in situ ».

L'étude macromorphologique des diverses formes d'accumulation de fer et de leur répartition dans les solums montrent que, sauf dans des cas particuliers (sols alluviaux des terrasses récentes, surface des sols), ces accumulations résultent de leur formation dans les solums, et que leur origine allochtone est peu probable. Elles résulteraient donc principalement de l'exportation des autres constituants des sols, notamment des argiles déferrifiés, et éventuellement d'apport latéral du fer en solution.

D'autre part, la composition chimique et minéralogique des concrétions ou glébulles sesquioxydiques est variable selon les sols où elles se trouvent et la roche-mère de ces sols.

Selon DROSDOFF et NIKIFOROFF (1950), les concrétions des sols des terrasses alluviales mal drainées de l'Orégon, de diamètre allant de 1 mm à 12 mm, ont des teneurs en fer plus faibles qu'en manganèse pour les grosses concrétions et inversement pour les plus petites concrétions. WINTERS (1938) avait auparavant abouti aux mêmes conclusions pour les concrétions des sols podzoliques (Red Yellow Podzolic Soils). Selon divers auteurs, cités par SEGALIN (opus citatus), les teneurs en  $Fe_2O_3$  des concrétions varient de 20% à plus de 80% et leurs teneurs en  $MnO_2$  de quelques ppm à plus de 70%. Nous verrons ci-après que les concrétions des sols ferrugineux ou fersiallitiques-ferrugineux des régions étudiées, sont pauvres en manganèse et relativement moyennement pourvues en fer.

Signalons d'autre part, que la composition chimique de ces traits pédologiques, selon PARFENOVA et YARILOVA entre autre, cités par FEODOROFF (1969), est prise en considération pour leur classification au niveau supérieur.

Le second aspect du problème que suscitent les accumulations du fer dans les sols, porte sur leur mode de formation.

Selon WINTERS (1930) et d'autres, la formation des concrétions résulterait de phénomènes d'oxydo-réduction « in situ » et de concentration des sesquioxydes dans les pores (micropores) après précipitation et dessiccation. Pour BLUME, l'origine de toutes les concrétions serait identique sinon analogue, leur formation dépendant de la diffusion de l'oxygène dans les agrégats. Si la diffusion d'oxygène est rapide, les « nodules » prennent naissance dans les agrégats, si au contraire la diffusion est lente, il y a formation de pseudogley.

Enfin, selon SOLOKOVA, citée par MC KENZIE (1972), les concrétions « constituent une série de micro-colonies des bactéries de fer et de manganèse, ces deux éléments résultant de la précipitation de leurs hydroxydes ».

Sous climat méditerranéen, les concrétions observées dans les sols des terrasses anciennes de « Guadalquivir » seraient, selon BELLINFANTE et *al.* (1974), des formations anciennes résultant principalement de processus d'oxydo-réduction.

Les diverses formes d'accumulation de fer observées dans les sols des régions des Zaërs et leurs bordures sont souvent, à quelques rares exceptions, liées à des conditions d'hydromorphie temporaire. Leur formation résulterait donc principalement de l'alternance dans le temps, de processus d'oxydo-réduction, d'accumulation relative ou absolue du fer, consécutive à son oxydation, sa précipitation suivie de l'induration des produits ferrugineux précipités et de leur concentration dans la partie supérieure des solums, ou « toit » de la nappe temporaire.

Ces diverses accumulations de fer se présentent sous forme d'oolithes, pisolithes, concrétions et amas ferrugineux plus ou moins cimentés entre eux, formant un horizon concrétionné ou pétroferrique moyennement ou bien différencié.

#### Caractéristiques morpho-analytiques des accumulations de fer des sols des régions étudiées

##### — *Macro et micromorphologie*

#### Les taches ferrugineuses et manganiques

Les premières s'observent en dessous des horizons pétroferriques ou encore au sommet des horizons argilliques à pseudogley. Les secondes, de couleur noirâtre, s'observent surtout dans les horizons argilliques tirsifiés des sols ferrugineux des dépressions ou sur complexes de roches-mères. Ces traits pédologiques sont diffus, peu durs ou tendres et répartis sur les éléments pédiques. Sous microscope polarisant, ces cutanes (sesquanes) et gébules sesquioxydiques se présentent sous formes de chapelets de « spots » rougeâtres, ou de taches noirâtres diffusées (PL. 1, PHOTO 1, 2). Ces spots et taches ferrugineux et manganiques sont opaques et disséminés dans le fond matriciel où prédomine le plasma jaunâtre ou bigarré (pseudo-gley).

Ces deux formes d'accumulation de fer et/ou de manganèse évoluent en nodules sesquioxydiques de tailles plus grandes, de plusieurs millimètres de diamètre, diffuses ou sub-arrondies. Les taches (néo-sesquanes) devenant de plus en plus nombreuses, « envahissent » le fond matriciel où elles tapissent et colmatent les vides. Les nodules sesquioxydiques sont arrondis ou concentriques p.e. aux alentours d'une section racinaire ou d'un vide.

Les accumulations ferrugineuses peu dures ou diffuses forment aussi des « halos glébulaires » envahissant le fond matriciel jaunâtre. Leur couleur est rouge foncé et noirâtre (L.N.)\*; elles sont e.g. opaques (L.P.)\*. Les ferranes, les manganés et les halos glébulaires sont constitués principalement d'oxyhydrates et d'hydroxydes amorphes. Les clichés au scanner (S.E.M.) de ces traits pédologiques montrent des taches diffuses ou pelliculaires de quelques microns d'épaisseur ou des cutanes diffuses tapissant les parois des vides et des chambres, ou encore sous forme de fines « gouttelettes ». (PL. 1, PHOTOS 7 à 10). Ces gouttelettes s'organisent en « éléments globulaires » constitués d'oxyhydrates de fer amorphes (PL. 2, PHOTO 2.1 et 2.2 - PL. 4, PHOTO 1).

Dans les sols ferrugineux hydropédiques sur grès-calcaire, les glébules sesquioxidiques sont très dures, de couleur gris-métallique et de formes cavernueuses, enrobées d'une pellicule très fine et tendre tapissant les cavités mêmes de ces concrétions ferro-manganiques. On observe à l'œil nu, sur les parois des macro-cavités de quelques « concrétions » d'aspect « caverneux », des taches gris métalliques vers l'extérieur et vert-métalliques vers l'intérieur (manganés).

Au scanner \*\* on observe sur les parois des macropores (chambres) de ces « concrétions » des cutanes fines à micro-structure en « nid d'abeille », à l'intérieur des cutanes manganiques diffuses et très fines (PL. 2, PHOTOS 2.3 et 2.4).

Au fort grossissement, ces cutanes diffuses et « en nid d'abeille » semblent s'organiser en éléments « cryptocristallins ». Les diagrammes de diffraction des R.X. de ces cutanes (manganés) n'indiquent pas la présence d'oxydes et / ou d'hydroxydes bien cristallisés, à l'exception d'une faible raie à 2,57 Å, disparaissant après traitement à l' $H_2O_3$  et correspondant probablement à de la manganite ( $x MnOOH$ ). Selon Mc KENZIE (1971), cet hydroxyde de manganèse subsiste dans les sols à Ph 8.0 \*\*\*, mais il est transformé en oxyde de manganèse (pyrolusite) dès que le pH est inférieur à 8.0.

Les formes cristallisées déterminées dans les horizons « alcalisés » des sols ferrugineux tirsifiés à pH supérieur à 8.0. sont peu abon-

(\*) L.N.: lumière « naturelle »  
L.P.: entre nicols croisés

(\*\*) Scanner = microscope électronique à balayage Scanning electronic microscopy (S.E.M.).

(\*\*\*)  $2 MnOOH + 2 H^+ \rightarrow MnO_2 + Mn^{++} + 2 H_2O$  (pH 8).

dantes. Les raies de diffraction des R.X. correspondant aux oxydes (pyrolusite, manganosite) et hydroxydes (manganite, pyrochroïte) sont peu intenses dans tous les échantillons étudiés. Les « concrétions » d'aspect caverneux et très riches en cutanes manganiques contiennent très probablement des formes cryptocristallines (pyrolusite et/ou manganite), mais en très faibles quantités. Les manganés se présentent aussi sous formes de films très fins enrobant les éléments pédiques.

Au scanner, elles se présentent sous forme de pellicules lisses ou « boursouflées », qui, vues au fort grossissement, présentent une structure « en anneaux » ou en « pain d'épice ».

Dans leur ensemble, les manganés, les ferranes, les halos glébulaires et les nodules sesquioxydiques diffus paraissent amorphes aux R.X. et au microscope électronique à balayage, avec de faibles tendances cryptocristallines en milieu basique (alcalin). Ces divers traits pédologiques sont disséminés dans le fond matriciel où prédomine le plasma. Ils traduisent un stade initial d'accumulation de fer (et de manganèse), par « accrétion » ou addition de produits ferrugineux dans le s-matrix et particulièrement dans les pores, les fentes et autour des sections racinaires.

### Les oolithes, pisolithes et concrétions

Ces trois formes d'accumulation de fer et / ou de manganèse sont très dures, de forme arrondie ou subelliptique, oblongue, rarement en forme de croissant, subangulaire ou polyforme (\*).

Leurs dimensions respectives sont de 0,5 à 1 mm, 1 à 2 mm et de 2 mm à 5 cm au maximum. Au delà de ce diamètre médian, les accumulations de sesquioxydes de fer sont classées en amas ferrugineux constitués de plusieurs concrétions cimentées entre elles. La répartition des pisolithes et des concrétions ferrugineuses dans les sols ferrugineux n'est pas aléatoire, mais préférentielle. Elle résulte d'une concentration des traits pédologiques entre les horizons éluviaux (Aco, pi), assez riches par ailleurs en concrétions et en pisolithes et les horizons illuviaux (Bt1g,co). Ces concentrations de « glébules » sesquioxydiques sont continues ou discontinues dans les solums et dans le paysage, formant ainsi des horizons pisolithiques et concrétionnés, pétroplinthiques ou pétroferriques. Ces horizons sont respectivement peu durs et pénétrables aux racines ; ou massifs et durs à

(\*) Lithoreliques ferruginisées ou pseudo-concrétions.

très durs et impénétrables aux racines. Les concrétions et les pisolithes ferrugineux se concentrent également en surface des sols.

Les concentrations de ces glébules sont « absolues » ou « relatives » et résultent dans ce dernier cas de l'exportation des particules fines par érosion en nappe (sheet-flood) et par lessivage des argiles. L'accumulation des pisolithes et des concrétions s'observe également au sommet des horizons argilliques, correspondant à la zone de battement des nappes temporaires. Dans les sols à profil ferrugineux faiblement différencié (sols fersiallitiques aquiques), les pisolithes et de rares concrétions sont disséminés dans la masse argileuse de leurs horizons Btg.co ou Bdg.co. Leur distribution est aléatoire dans les fonds matriciels de ces horizons. Toutefois, les formes et la composition des pisolithes et des concrétions des horizons éluviaux et illuviaux sont identiques, sinon analogues dans un même profil. Cette analogie des concrétions et des pisolithes peut constituer un indice de leur formation « in situ ».

L'examen de ces traits pédologiques au microscope polarisant confirme l'analogie des glébules réparties dans les horizons éluviaux, pétroferriques et illuviaux, soit :

— des nodules et des concrétions de forme arrondie ;

les oolithes typiques sont de forme sphérique et leurs contours extérieurs sont réguliers, les pisolithes typiques sont plus riches en sesquioxides de fer et leur squelette de quartz est réduit, les concrétions sont constituées e.g. d'un squelette de quartz plus abondant, cimenté par des sesquioxides de fer brun-rouge foncé (L.N.) et noirs (L.P.) (matrice interne opaque) (PL. 1, PHOTO 4).

— des pisolithes et des concrétions ferrugineuses de forme arrondie dominante, rarement oblongue ou elliptique ; constituées de deux zones distinctes ; l'une rougeâtre (L.P.) plus riche en sesquioxides de fer, l'autre rougeâtre clair et jaunâtre, constituée de fer et d'argile. Quelques rares glébules sesquioxidiques présentent une forme interne en « croissant ».

Dans leur ensemble, ces traits pédologiques sont très riches en sesquioxides noirs, amorphes, mais leur squelette de quartz reste assez abondant. De par leur composition et leur distribution dans les fonds matriciels, on distingue :

1°) Glébules plus riches en sesquioxides qu'en quartz ; ces glébules étant ennoyées dans un fond matriciel à plasma jaune ou bigarré dominant (PL. 1, PHOTO 1).

2°) Des glébules constituées d'un squelette de quartz cimenté par des sesquioxydes amorphes et disséminés dans un fond matriciel où le plasma et le squelette sont sensiblement équivalents : glébules des sommets des horizons argilliques et des horizons pétroplinthiques ;

3°) Des glébules constituées d'un squelette de quartz dominant par rapport aux sesquioxydes qui les cimentent, ces glébules étant disséminées dans les vides ou dans un fond matriciel à squelette de quartz nettement dominant : horizons pétroferriques et horizons éluviaux A1co, A3co, pi. Dans ces horizons, les glébules occupent plus de la moitié (en volumé) du fond matriciel (horizons « apédaux »).

4°) Des lithoreliques ferruginisées, constituées de gros grains de quartzite « patinés », de diamètre supérieur à 5 mm. Ces lithoreliques sont associées aux traits pédologiques précédents et occupent dans quelques sols plus de 50% du fond matriciel (stone-lines, iron, stones...).

En outre, les concrétions peuvent être constituées d'une matrice homogène ou de plusieurs couches concentriques « en pelures d'oignons » (assemblage interne concentrique) comportant ainsi :

- un épicarpe ou couche extérieure généralement très sombre et très dure, opaque, plus riche en sesquioxydes qu'en quartz (squelette), ou, contrairement d'un squelette de quartz dominant cimenté par des faibles quantités de sesquioxydes ;
- un endocarpe de nature variée, constitué de quartz ou de particules terreuses ferruginisées ou par du vide (grosses concrétions) (PL. 3, PHOTO 2).

Dans leur ensemble, les glébules sesquioxydiques et les sesquanes (manganés et ferranes) sont constituées de sesquioxydes de fer amorphe dominant et de très faibles quantités d'oxydes et d'hydroxydes de manganèse, essentiellement amorphes, opaques avec de rares petites zones biréfringentes.

### *Composition chimique et minéralogique*

Les éléments totaux des diverses formes d'accumulation du fer sont déterminés par attaque triacide sur diverses fractions finement broyées. Les valeurs moyennes des éléments cardinaux de ces formations sont portées sur le tableau 1.

On constate que :

- 1°) Quelle que soit la taille « moyenne » des diverses formes

d'accumulation de fer : oolithes, pisolithes, concrétions..., celles-ci contiennent plus de 40 % de résidus (insolubles et quartz).

2°) Leurs taux de silice et d'alumine combinée sont très variables en fonction de leur taille moyenne ; d'où l'estimation de la fraction phyllosilicatée et silicatée de ces formations est difficile, d'autant plus que les rapports  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  sont variables. Ceci du fait probablement des variations de leurs compositions internes décrites précédemment ;

3°) Les rapports molaires de la fraction silicatée des concrétions sont e.g. supérieurs à 2.0. Cependant les oolithes et les grosses concrétions présentent des rapports molaires  $\text{SiO}_2$  combiné /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  légèrement inférieurs à 2.0. Ceci résulterait probablement soit de la prédominance de minéraux 1/1 (kaolinite) dans ces formations, soit de minéraux silicatés riches en fer (biotite, fréquente dans les concrétions et pisolithes des sols sur granite). Cette approche est hypothétique du fait que nous avons estimé que le fer total des diverses formes d'accumulation du fer est sensiblement analogue au fer libre. Néanmoins, les taux de fer lié dans certaines oolithes, pisolithes et concrétions à composition interne riche tant en quartz qu'en plasma, pourraient être assez élevés ; ceci ramènerait leurs rapports molaires à des valeurs moyennes supérieures à 2.0.

4°) Les diverses formes d'accumulation du fer ne contiennent en fait que des taux de fer total relativement faibles par rapport aux mêmes formations observées e.a. aux îles Hawaii et qui contiennent plus de 80 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  selon SHERMAN (1954) ou à Madagascar où les concrétions contiennent plus de 50 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  selon SEGALIN (opus citatus). Dans les sols étudiés, les diverses gébules contiennent moins de 30 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et ce, quelles que soient leurs dimensions. Sous climat tempéré, les concrétions des sols hydromorphes contiennent des taux équivalents de fer total, les sols étudiés étant classés par ailleurs en sols hydromorphes selon la C.P.C.S. (1967).

5°) Les taux de manganèse total sont e.g. très faibles à faibles, de l'ordre de quelques ppm à 1,7 % de  $\text{MnO}_2$  au maximum dans les grosses concrétions « ferro-manganiques ».

En fait, ces taux sont en corrélation positive avec les données micromorphologiques puisque les cutanes (manganés) ne représentent qu'un très faible volume des diverses formes d'accumulation de fer.

Dans leur ensemble, ces diverses formes ne contiennent que très peu de fer sous forme cristallisée. Les pics caractéristiques de la goethite, de l'hématite et de la lépidocrocite sont faibles et n'apparais-

sent que dans quelques échantillons dispersés aux ultra-sons. L'intensité de ces pics est néanmoins très faible, eu égard aux teneurs en fer total de ces formations.

Il en résulte que les diverses formes d'accumulation de fer des ferrisols xérothériques sont constituées principalement d'oxyhydrates amorphes (stilpnosidérite). La présence dans ces traits de silice et d'alumine combinée (silicatées) réduit la probabilité de formation de complexes ferri-siliciques ou ferri-alumino-siliciques en quantité significative. Selon HENIN (1954) et SEGALEN (1956), l'existence de ces complexes dans les concrétions des sols ferrugineux ou ferrallitiques est possible. Par contre, selon TRAN-VAN-AN (1967), les concentrations de fer et de silice dans les sols tropicaux ne permettent pas la formation de complexes ferri-siliciques. Ceci implique des rapports minimum Si/Fe de l'ordre de l'unité d'après DE KONINCK (1967). Dans les sols fersiallitiques méditerranéens, REIFENBERG (1935), puis BASTISSE et DEMOLON (1938, 1944) ont tenté leur mise en évidence directe dans ces sols.

Au Maroc la composition chimique et minéralogique des divers traits pédologiques des sols ferrugineux xérothériques semblent indiquer que les complexes ferri-siliciques sont, s'ils existent, négligeables, puisque la silice est principalement sous forme de quartz ou de silicate. La détermination par voie chimique des taux réels de silice et de fer amorphes dans les sols reste encore sujette à caution.

### **Classification chimique et minéralogique des « glébules sesquioxydiques » des sols ferrugineux xérothériques**

Les glébules sesquioxydiques sont des traits pédologiques définis essentiellement selon leurs formes, leurs textures, leurs structures et leurs dimensions. La nature de leurs constituants, soit leur composition interne, n'est pas prise en considération dans la nomenclature de ces traits pédologiques au niveau supérieur par BREWER et d'autres.

Les diverses formes d'accumulation de fer des sols étudiés se caractérisent par :

- leur richesse en silice sous forme de quartz dominant ;
- leur taux de fer variant de 15 à 30% en moyenne ;
- leur taux de silice et d'alumine combinée silicatée, e.a. comme argile du type 1/1 et 2/1 en quantité variable. Ce sont donc de par leur composition chimique et minéralogique interne des « fersiallites » (\*).

(\*) Fersiallite : terme proposé pour la première fois dans ce texte ; forme contractée de Fe-Si-Al... traduisant la concentration du fer dans un matériau silicaté contenant e.a. des minéraux 2/1.

Ce type chimique et minéralogique peut être subdivisé en sous-types quartzeux (très riches en quartz), ferrugineux (plus de 15% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Ces formations se distinguent notamment de celles décrites sous climat tropical et qui, sur roches basiques, sont riches en alumine libre, amorphe ou cristallisée (bœhmite, gibbsite).

En conclusion, les diverses formes d'accumulation de fer des sols des régions étudiées (glébulles sesquioxydiques ou fersiallites) se caractérisent par :

1. leur teneur en fer total de l'ordre de 15 à 30% au maximum ;
2. leur richesse en fer sous forme amorphe dominante ; la goëthite, l'hématite, et la lépidocrocite ne représentent que de très faibles quantités (estimation semi-quantitative) ;
3. leur faible teneur en manganèse ;
4. leur grande richesse en résidus (quartz et insolubles) supérieurs à 40% au minimum ;
5. leurs minéraux argileux du groupe de la kaolinite et de l'illite et des traces d'interstratifiés ;
6. la présence de minéraux altérables (sols sur granite) ou leur rareté (sols sur schistes, grès-calcaire) ;
7. l'absence d'hydroxydes d'alumine sous forme cristallisée (gibbsite ou bœhmite).

### Horizons diagnostiques pétroferriques et pétroplinthiques

Les accumulations de fer fortement indurées dans les sols sont connues de par le monde sous diverses appellations : contact pétroferrique (Soil Taxonomy), carapace ou cuirasse ferrugineuse (France), pétroplinthite (SYS), lithoplinthite (Guy SMITH et TAVERNIER), stone-line, iron-stones ou sesquioxyde-sheet (7th. Approximation, USDA), latérite (BUCHANAN et d'autres), Merzag et Mekzaz (Maroc)... etc.

Si morphologiquement, toutes ces formations présentent quelques analogies, elles diffèrent néanmoins de par leurs compositions chimiques et minéralogiques et leurs répartitions dans ou sous et sur les solums, appartenant à divers ordres (ou classes) de sols.

#### *Définition de l'horizon pétroferrique*

L'horizon pétroferrique est un horizon constitué de concrétions indurées (oolithes, pisolithes et concrétions s.s.) plus ou moins cimen-

tées entre elles, formant une phase continue d'au moins 15 cm d'épaisseur et occupant au moins 50% en volume de la masse totale de l'horizon.

Les concrétions contiennent au minimum 15% de fer libre exprimé en  $Fe_2O_3$  et fréquemment un peu de manganèse, seulement des traces d'humus et d'alumine libre. La matrice entre et dans les concrétions est constituée, outre de quartz (dominant), d'autres minéraux insolubles et de minéraux silicatés dont les minéraux argileux du type 1/1 et 2/1. Les rapports molaires de la fraction silicatée de cette matrice sont e.g. supérieurs à 2.0. De par sa composition minéralogique et e.g. en minéraux 2/1, l'horizon pétroferrique se distingue de l'horizon pétroplinthique défini selon Sys *et al.* (1969).

Il se distingue également des horizons placiques et des horizons spodiques indurés (örtztein, alios) de par sa faible teneur en humus. Le fer des horizons pétroferriques et de ses constituants est principalement sous forme amorphe, avec de faibles quantités d'oxydes (hématites) et d'hydroxydes (goethite, lépidocrocite) cristallisés.

Du point de vue génétique, l'horizon pétroferrique se forme par ségrégation du fer et son accumulation « in situ », résultant de l'alternance des processus d'oxydo-réduction. Probablement, dans certains cas il y a accumulation absolue du fer par apport latéral ou vertical per ascensum. Cet horizon se situe et se forme dans une matrice partiellement déferrifiée. De ce fait, l'argile de cette matrice est facilement dispersable, ce qui favorise sa migration. Il en résulte la formation et / ou le maintien d'un changement textural abrupt.

L'horizon pétroferrique est considéré comme critère diagnostique (horizon diagnostique) dans les sols subissant une hydromorphie temporaire, quand il se situe immédiatement au-dessus d'un horizon argillique dont la transition vers l'horizon éluvial s'accompagne d'un changement textural abrupt et, quand cet horizon argillique peu perméable, se situe à moins de 1,50 m de profondeur.

### *Macromorphologie*

Dans les sols ferrugineux xérothériques, ainsi que dans les sols fersiallitiques ferrugineux, l'horizon pétroferrique a une épaisseur variant d'une quinzaine de centimètres au minimum à plus de 50 cm,

avec un maximum observé de 130 cm (horizon pétroferrique fossile ou paléo-cuirasse).

Les horizons pétroferriques différenciés ont une épaisseur moyenne de trente centimètres environ, dans les sols ferrugineux des Bas-Plateaux des Zaërs répartis sur les surfaces planes ou faiblement ondulées. Ces horizons sont indurés et leur limite inférieure est fréquemment ondulée (sinusoïdale). Celle-ci exprime un accroissement progressif de ces horizons au dépens des horizons illuviaux (argilliques) notamment à hauteur des franges d'évaporation des nappes temporaires ou « zones de dégradation des horizons argilliques ». Cette répartition des horizons pétroferriques dans les solums et dans le paysage traduit explicitement leur formation « in situ » (Pl. 3, PHOTO 1).

#### Profondeur, texture

L'horizon pétroferrique est constitué d'oolithes, de pisolithes et de concrétions et d'une matrice limono-sableuse ou sablo-limoneuse occupant moins de 50% du volume total. Le plus typique est constitué d'au moins de 75% de concrétions ferrugineuses cimentées entre elles par des sesquioxides de fer indurés. Selon leur concentration et l'épaisseur des horizons, on distingue :

##### 1. - Les horizons pétroferriques peu épais et discontinus

(15 à 20 cm d'épaisseur moyenne), constitués de concrétions et de pisolithes très dures ennoyées dans une matrice argilo-limono-sableuse, assez riche en oxydes peu durs et diffus (ferranes et manganés) : cet horizon est pénétrable aux racines.

##### 2. - Les horizons pétroferriques épais

(20 à 30 cm d'épaisseur) moyennement à fortement indurés, contenant plus de 75 % de concrétions ennoyées dans une matrice très appauvrie en éléments fins (moins de 15 % d'argile granulométrique) ; discontinus dans le solum, faiblement indurés et pénétrables aux racines par places (l' limite inférieure digitée). Sur granite, ces horizons pétroferriques différenciés sont constitués d'une matrice limono-sableuse friable.

##### 3. - Les horizons pétroferriques épais et très durs

(épaisseur moyenne supérieure à 30 cm), continus dans les solums : la matrice de ces horizons à texture grossière est très réduite.

Les amas et les concrétions ferrugineuses représentent plus de 90% du volume total de l'horizon pétroferrique. Celui-ci contient fréquemment des lithoreliques quartzitiques ferruginisés.

#### 4. - Les horizons pétroferriques fossiles

(paléo-cuirasses) analogues aux précédents ; affleurant souvent en bordure des plateaux, des thalwegs ou des dayas.

Ces horizons ont été probablement formés dans des sols qui furent ultérieurement décapés de leur partie supérieure plus meuble. Sur les Hauts-Plateaux des Zaërs, ces horizons s'observent exceptionnellement sur quelques versants taillés dans le socle paléozoïque. Ces horizons peuvent être en fait considérés comme de nouvelles zones de départ du fer ou « roche-mère » des sols situés en aval.

### Structures

Les horizons pétroferriques peu différenciés ont une structure pisolithique, leur matrice étant peu structurée et à tendance monoparticulaire. Les horizons pétroferriques différenciés ont une structure pisolithique rarement « bréchique », massive ou vacuolaire. Cette structure des horizons pétroferriques des sols des régions étudiées, exprime une accumulation optimale des concrétions et des pisolithes dans ces sols.

### Dureté, porosité et cimentation

La porosité des horizons pétroferriques décroît en fonction du nombre de concrétions et de leur degré de cimentation. La porosité est minimale (moins de 25%) dans les horizons pétroferriques où les « concrétions » sont fortement cimentées entre elles et très dures (horizon pétroferrique typique).

### *Micromorphologie*

L'examen de plusieurs lames minces d'échantillons représentatifs des horizons pétroferriques montre que les oolithes, pisolithes et concrétions sont individualisés dans un fond matriciel poreux où le squelette de quartz est nettement dominant (horizons apédaux). La micro-structure des horizons pétroferriques reflète celle de leurs traits pédologiques décrits précédemment ; de forme arrondie dominante, constitués de très peu de plasma ; de grains de quartz dominants anguleux et de taille variée ( $\phi$  moyen de 200 à 300 microns), cimentés

par des oxydes et hydroxydes de fer (et de manganèse) amorphes dominants (PL. 3, PHOTO 3). L'espace externe aux concrétions est constituée de vides, de grains de squelette et des traits pédologiques suivants :

1. des litho-reliques ferruginisées analogues aux concrétions ou aux amas ferrugineux. Ce sont en fait de « fausses » glébules sesquioxydiques.  
Ces litho-reliques ferruginisées sont très abondantes dans les sols ferrugineux pétroferriques sur quartzites et sous forêt, ainsi que dans les paléo-cuirasses.
2. des argillanes inter-glébules, réparties entre les concrétions.
3. des ferri-argillanes et des argillanes traversant la matrice des horizons pétroferriques.

La présence de ces deux derniers traits pédologiques constitue un critère majeur du lien génétique existant entre les horizons pétroferriques et les horizons sus-jacents. La composition de leur squelette traduit à la fois l'influence de la roche-mère dans la formation des sols ferrugineux et les remaniements de leurs matériaux parentaux. Ainsi, sur granite, les horizons pétroferriques contiennent des feldspaths et des micas altérés. Ces deux minéraux disparaissent totalement des sols sur schistes et quartzites des Bas-Plateaux, constitués de litho-reliques exclusivement quartzitiques.

Les matériaux originels furent donc remaniés comme en témoigne la répartition de litho-reliques dans les horizons diagnostiques argilliques et pétroferriques. Le ciment ferrugineux inter ou intra-glébules est brun-rouge très foncé ou brun noirâtre (L.N.) et opaque (L.P.) et ne présente que quelques rares « spots » rouges, biréfringents à extinction droite (goethite). Les formes du fer et du manganèse des horizons pétroferriques paraissent amorphes à l'examen micromorphologique, avec de très faibles proportions de produits cristallisés.

Les horizons pétroferriques typiques sont constitués de concrétions s.s., à plusieurs couches concentriques ou « en pelure d'oignons », à noyau riche en fer ou en particules fines terreuses ou encore à noyau central vide ou constitué d'une ou de plusieurs litho-reliques (Cf. PL. 3).

La limite entre les horizons pétroferriques et argilliques est nette et brutale et se traduit par :

- une diminution des glébules sesquioxydiques et une augmentation du plasma par rapport au squelette (de quartz) dans l'horizon argillique ;
- une diminution des éléments pédiques dans l'horizon pétroferrique et une augmentation relative du squelette.

La transition de haut en bas, des horizons pétroferriques aux horizons argilliques, se traduit par un changement net des distributions relatives de leurs plasmas et de leurs squelettes ; granulaire à intertextique dans les premiers, porphyrique dans les seconds.

*Comparaison chimique des sols ferrugineux pétroferriques ou ferrisols xérothériques (Petroferric Ochraqualfs) des régions des Zaërs et leurs bordures*

Les éléments totaux déterminés par attaque triacide sur diverses fractions des horizons diagnostiques des sols ferrugineux pétroferriques montrent que :

- les horizons pétroferriques Bpe et concrétionnés Alco.pi et A3co.pi reflètent la composition chimique de leurs constituants : oolithes, pisolithes et concrétions, examinés précédemment ; soit notamment :
- des taux de fer total compris entre 15 et 30% et des taux de résidus (quartz et insolubles) de 37 à 54 %.
- des variations aléatoires des taux de silice et d'alumine combinées des horizons pétroferriques, mais nettement plus faibles par rapport aux horizons sous-jacents (argilliques) ;
- de faibles taux de manganèse total ;
- des rapports molaires  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  \* supérieurs à 2.0 situant ces sols dans le secteur « siallitique » \*\*, caractérisé par une accumulation élevée du fer dans la partie supérieure des profils.

On constate en outre que les rapports molaires sont variables selon les fractions considérées. La valeur de ces rapports n'est donc significative que pour les constituants considérés.

En général, les fractions fines ne présentent pas de variations sensibles des rapports molaires  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de bas en haut des profils traduisant et corroborant une « stabilité » globale du « complexe

(\*)  $\text{SiO}_2$  combinée /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (fraction silicatée).

(\*\*) Sous-type sialo-ferrique selon la terminologie de D'El VILLAR (1950).

d'altération » sur lequel se sont développés les sols dont l'évolution porte principalement sur l'accumulation du fer en surface.

*Composition minéralogique des horizons pétroferriques des ferrisols xérotériques (FIG. 2)*

Compte-tenu des fortes teneurs en fer total des sols ferrugineux par rapport aux Tirs (xererts) et aux sols fersiallitiques (xeralfs), ainsi que de la présence de silice combinée et d'alumine totale dans des taux variables, alors que le rapport de ces deux éléments reste sensiblement constant, nous avons réalisé plusieurs déterminations aux R.X. et au microscope électronique à balayage (S.E.M.) et à transmission (T.E.M.) de leurs fractions fines ( $> 2 \mu$ ) et grossières (limons, sables et pseudo-sables) finement broyées et dispersées aux ultra-sons.

Ces déterminations, réalisées pour les diverses formes d'accumulation de fer, ont corroboré la prédominance des produits ferrugineux et ne présentent guère de variations sensibles par rapport à leurs éléments constitutifs (concrétions).

En effet, les horizons pétroferriques se caractérisent par :

- la prédominance du quartz : pics à 4.26 Å et 3.33 Å, très intenses dans toutes les fractions finement broyées.
- de faibles quantités de micas (illites) et de kaolinite dans les fractions limoneuses (2-50  $\mu$ ) des horizons pétroferriques des Bas-Plateaux (BP1-a), relativement un peu plus abondants dans les fractions grossières (50  $\mu$  - 2 mm) et limoneuses (2-50  $\mu$ ) des horizons pétroferriques des Hauts-Plateaux (HP1-a).
- de très faibles quantités d'hydroxydes et d'oxydes ferriques : (goethite, lépidocrocite, hématite) et des traces de pyrolusite, d'hausmanite et de manganite, observées dans les échantillons dispersés aux ultra-sons ;
- de la kaolinite, de l'illite, des interstratifiés gonflants, et des faibles quantités de smectites dans les fractions fines ( $< 2 \mu$ ) des horizons pétroferriques des Hauts-Plateaux et des Bas-Plateaux.

La présence de ces minéraux argileux dans les fractions fines des horizons pétroferriques constituent un de leurs caractères fondamentaux.

D'autre part, malgré leur richesse en fer total, les horizons pétroferriques sont constitués principalement de produits ferrugineux amorphes.

Les clichés au microscope électronique à balayage et à transmission montrent en effet (PL. 3 et 4) :

- 1) des glomérules mamelonnés répartis sur les agrégats.
- 2) des glomérules répartis sur les agrégats, de forme globulaire mais d'aspect caverneux en forme de « gryère » ou de « nid d'abeille » (PL. 4, PHOTO 3).
- 3) des cutanes (manganes et ferranes) répartis sur les parois des vides, essentiellement amorphes, avec de rares zones cryptocristallines ;
- 4) des filaments en forme de pseudo-mycélium correspondant probablement à des oxyhydrates de fer amorphes ;
- 5) des bâtonnets d'halloysite associés à des produits amorphes et de nombreuses cristallites, hexagonales (kaolinite entourée de sesquioxydes de fer ou encore de chapelets de formes hexagonales mal définies (fire-clay) ;
- 6) des cutanes ferrugineuses paraissant amorphes, s'individualisant en une multitude d'éléments d'aspect étoilé évoluant en goethite par places (PL. 4, PHOTO 2) ;
- 7) l'envahissement des cavités des agrégats des horizons argilliques à pseudo-gley et acides par des rosettes de cristallites de goethite.

Cette forme caractéristique de la goethite, observée par de nombreux auteurs dans les sols tropicaux (ESWARAN H. *et al.*, e.a.) n'a été observée dans aucun des traits pédologiques des horizons pétroferriques des sols sur schistes et quartzites où prédominent les formes amorphes.

- 8) des cristallites de kaolinite et de goethite associées à des gels amorphes de fer du sol ferrugineux sur granite (PL. 4, PHOTO 4).

Les horizons pétroferriques des sols ferrugineux se caractérisent dans leur ensemble par leur richesse en résidus insolubles (quartz), la présence dans leur fraction fine de minéraux argileux du groupe de la kaolinite, des illites et de faibles quantités de smectites, ainsi que par leur richesse en sesquioxydes de fer essentiellement amorphes.

Ces sols contiennent de très faibles quantités d'hydroxydes et d'oxydes de fer ou de manganèse cristallisés (goethite, pyrolusite, hématite). Leur richesse en produits ferrugineux amorphes et la présence de minéraux argileux 2/1 constitue l'un des critères fondamentaux de leur distinction des horizons pétroplinthiques ou des latérites des pays tropicaux. Les horizons pétoferriques des sols ferrugineux xérothériques méditerranéens sont en général moins riches en fer total.

Les principales caractéristiques morpho-analytiques des horizons pétoferriques des sols étudiés et celles des horizons pétoplinthiques étudiés e.a. par Sys C. (1968) sont portés sur le tableau suivant, situant à la fois leurs caractères communs et leurs différences majeures.

### Conclusion

De part la répartition des horizons pétoferriques dans les solums, leur composition chimique et minéralogique, leur lien génétique avec les horizons sus et sous-jacents, éluviaux et argilliques, ces horizons devraient être considéré comme horizon de diagnostic, base de la typologie des sols ferrugineux ou « Ferrisols » xérothériques. En Soil Taxonomy, ces horizons sont considérés comme des formations fossiles (contacts pétoferriques, iron-stone...) et n'apparaissent qu'au niveau des familles ou des phases. Selon la C.P.C.S., ils ne sont également pris en considération qu'au niveau des sous-groupes (sols hydromorphes peu humifères à pseudo-gley à carapace ou cuirasse).

Au Maroc, dans les régions des Bas-Plateaux ou de la Méséta Atlantique Marocaine, les horizons pétoferriques confèrent aux sols leurs particularités morphologiques et physico-chimiques. De ce fait, tout sol présentant un horizon pétoferrique différencié est classifié en Ferrisol à régime hydrique aquique, évoluant sous climat xérothérique distinct notamment des sols fersialliques (alfisols, xeralfs) ou des tirs (xerert) à profil ferrugineux faiblement différencié.

D'un point de vue agronomique, l'horizon pétoferrique représente une contrainte agronomique majeure. Sa répartition à mi-profondeur des sols réduit leur volume utilisable et limite la pénétration des racines dans l'horizon argilique potentiellement plus fertile.

De ce fait, toute utilisation agricole des sols à horizon pétoferrique implique des aménagements spécifiques dont le sous-solage, le défoncement, le drainage et la fumure de fond.

*Tableau comparatif des caractéristiques morpho-analytiques des horizons pétroferriques des sols ferrugineux xérohériques (méditerranéens) et des horizons pétroplinthiques des sols ferrugineux ou « Ferrisols » tropicaux.*

	Horizons pétroferriques	Horizons pétroplinthiques
Types de sols	— Sols ferrugineux et sols fersiallitiques ferrugineux Alfisols (Aqualfs)	— Alfisols (Aqualfs), Ultisols (Tropaquults, Tropodults, Tropustults)
Epaisseur	— 15 cm. au minimum, 30 cm en moyenne, 150 cm au maximum	— 15 cm au minimum, plusieurs mètres au maximum
Dureté	— Durs (carapace) à très durs (cuirasse)	— Durs (pétroplinthique) à très durs (lithoplinthique)
Structure	— Pisolithique	— Scoriacée, bréchique, massive
Volume	— 50% au minimum de concrétions très dures	— 25% de concrétions dures (minimum)
Répartition — dans les sols	— Entre les horizons éluviaux et illuviaux, et à moins de 100 à 120 cm de profondeur,	— A moins de 150 cm de profondeur, fréquemment en surface (latérites)
— dans le paysage	— Continue, discontinu ou affleurant,	— Discontinu, continu, affleurant...
Limites entre les horizons sus - et sous - jacents	— Tranchée, régulière ou « sinusoïdale »	?
Composition chimique	— Fer total: 15% au minimum, moyenne de 20 à 25% maximum observé : 30%. — Silice combinée, alumine combinée, bases (faibles) — Manganèse (faible) — Résidus insolubles (40% au minimum)	— Plus de 30% de fer total (30 à 50% en moyenne)  — Silice combinée, alumine combinée et libre — Manganèse (variable) — Résidus insolubles (?)
Composition minéralogique	— Quartz + fer amorphe dominants — Kaolinite, illite, montmorillonite et interstratifiés — Allophanes très rares — Faibles quantités de goethite, hématite, lépidocrocite et hausmanite, pyrolusite et manganite	— Quartz, goethite, hématite, kaolinite, pyrolusite   — Gibbsite, boehmite...
Minéraux en grains	— Ubiquistes et quartz dominants, — Feldspaths, micas, grenats, paramétamorphes (hornblendes rares)...	— Ubiquistes et quartz dominants — Minéraux altérables très rares
Rapports molaires	— $SiO_2/Al_2O_3$ supérieur à 1.9 — 2.0.	— $SiO_2/Al_{23}$ « 2, de l'ordre de l'unité (ou < 1.0 gibbsitique)
Différences majeures	— Produits ferrugineux amorphes — Absence de gibbsite  — Présence de minéraux argileux autres que des kandites — Présence de minéraux altérables.	— Produits ferrugineux cristallisés — Présence fréquente de gibbsite ou de boehmite. — Absence ou rareté des minéraux argileux autres que des kandites, — Absence de minéraux altérables

## BIBLIOGRAPHIE

- BELINFANTE, N. PANEQUE, G. BANOS et L. CLÉMENTE — 1974. — 4th Int. Working Meeting on Soil Microbiology, Ontario.
- BREWER, R. — 1960 b. The Petrographic Approach to the Study of Soils. — 7th Int. Cong. Sci., 1, pp. 1-13, Madison.
- BREWER, R. — 1964. Fabric and Mineral Analysis of Soil. John Wiley & Sons Inc.
- BREWER, R. & J.R. SLEMAN, — 1964. Glaebules, Their Definition, Classification and Interpretation — Journal of Soil Sci. Vol. 15, n° 1, Div. of Soils, C.S.S.R.O., Camberre, Australia.
- BREWER, R. 1973. — Some Considerations Concerning Micromorphological Terminology — 4th Int. Working-Meeting on Soil Micromorphology, pp. 29-48, Ontario.
- BUCHANAN, F. 1902. — A Journey from Madras Through the Countries of Mysore, Canara and Malabar etc... in 1800-1801 (London).
- C.P.C.S. 1967. — Classification des sols. — Trav. C.P.C.S., ENSA, Grignon, France.
- DROSDOFF, M. et <sup>U</sup>. NIKIFOROFF 1950. — Iron Manganese Concretions in Dayton Soils. — Soil Sci. Amer. Proc. 49, pp. 333-345.  
Working Meeting on Soil Microbiology, Ontario.
- DE CONINCK, F. 1976. — Charge and Acidity of Soil Materials. - Gent.
- ESWARAN, H. 1972. — Micromorphological Indicators of Pedogenesis in Some Tropical Soils Derived from Basalts from Nicaragua - Geoderma 7, pp. 15-31.
- FEDOROFF, N. 1969. — Cong. Int. de Micromorphologie. Grignon.
- KUBIENA, W.L. 1951. — The soils of Europe, Illustrated Diagnosis and Systematic. — ed. Thomas-Murby, (Londres).
- Mc KENZIE, R.M. 1971. — The Manganese Oxides in Soils. A Review. — Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 131, Band, Heft 3.

- RICE, H.M. & R. LEVICK, 1953. — Material Removed by Jeffries Magnesium Ribbon, Potassium Oxalate Method of Cleaning Soil Particles. - Soil sci. 75 ; 1953.
- SEGALEN, P. 1964. — Le fer dans le sol — initiations documentations techniques ORSTOM, Paris.
- SYS, C. *et al.* 1969. — Les sols de l'Afrique centrale dans la classification américaine. — 7è approximation. Sols Africains / African Soils ; Vol. XIV N 1-2.
- SOIL TAXONOMY. 1975. — U.S.D.A.
- SHERMAN, C.D. *et* Y. KANHEIRIO, 1954. — Origin and Development of Ferruginous Concretions in Hawaiian Latosols. — Soil Sci. Soc. Amer. Proc. n° 77, pp. 1-8.
- TAVERNIER, R. and Guy D. SMITH. 1957. — The Concept of Braunerde (Brown Forest Soils) in Europe and the United States. Advan. Agron. 9, pp. 217-289.
- TRAN-VINH-AN, J. 1967. — Les systèmes ternaires « Oxydes de Fer-Silice-Kaolinite » et la pédogenèse des sols tropicaux. — Thèse Dr. Sci.
- USDA. 1968. — 7th Approximation.
- WINTERS. 1938. — Ferro-Manganiferous Concretions from some Podzolic Soils. - Soil Sci., pp. 33-40.

## ملخص

### الافق التشخيصي الحديدي (Petroferrique)

#### للدكتور غانم حدو

ان آفاق تراكم الحديد في الاراضي الحديدية بالمناطق الجافة (Ferrisols) (Xérothériques) يعطي لهذه التربة مميزاتا الفيزيائية والكيمائية الخاصة . ان تكوين هذا الآفاق هو في نفس الوقت معاصر قبل معاصر وينتج عن التراكم النسبي و (أو) المطلق للحديد في الآفاق الالكرية (Alco ochriques) والآفاق الطينية (Btg) « الارجيليك » (argillique) ان ارتباط تكوينها وتوزيعها في « السلوم » (solum)

بالآفاق الفوقية والتحتية جعلت المؤلف يعيد النظر في دور هذه الآفاق في تصنيف تربة المغرب . وقد اقترح تعويضا يركز على المعايير التشكيلية والتحليلية والوراثية الاق « البتروفيريك » أي الحديدية المتصلبة (Pétroferrique) . ويمكن اعتبار هذا الاق كافق تشخيصي أو كقياس أساسي لتصنيف الاراضي Soil Taxonomy (1975) .

ان التكوين التشكيلي الدقيق لهذا الاق وطبيعة مركباته تشهد في صالح تكوينه في موقع (in situ) بتصدير الطين الذي خلع منه الحديد وبتراكم الحديد (Ferrique) وهاتان العمليتان محددتان بتناوب سياقات التاكسد والاختزال (Oxido-réduction) ومن الناحية الزراعية . فان تواجد الاق البتروفيريك الحديدية الصلبة في العمق المتوسط للسلم (Solum) يكون عائقا مهما لاستصلاحها لان هذه العملية تحتم تصريف الماء وتحطيم الاق البتروفيريك والتسميد العمقي لكل المزروعات .

## RESUMÉ

Les horizons d'accumulation de fer des ferrisols xérothériques (Petroferric Ochraqualfs) confèrent à ces sols leurs propriétés physico-chimiques particulières. La genèse de ces horizons est à la fois actuelle et sub-actuelle et résulte de l'accumulation relative et/ou absolue du fer entre les horizons ochriques (A1co) et les horizons argilliques (Btg). Leur répartition dans les solums et leur genèse, liées aux horizons sus- et sous-jacents ont conduit l'auteur à reconsidérer le rôle de ces horizons en typologie des sols du Maroc. Il propose une définition basée sur des critères morpo-analytiques et génétiques de l'horizon pétroferrique. Celui-ci pourrait être retenu comme horizon diagnostique, soit comme critère de base pour la classification des sols selon « Soil Taxonomy » (1975).

L'organisation micro-morphologique de cet horizon ainsi que la nature de ses constituants, plaident en faveur de sa formation in situ, par exportation des argiles déferrifiées et accumulation du fer, régies par l'alternance des processus d'oxydo-réduction (ferrilyse).

D'un point de vue agronomique, la présence de l'horizon pétroferrique à mi-profondeur des solums constitue l'une des contraintes

majeures à leur mise en valeur. Celle-ci implique le drainage, le défoncement de l'horizon pétroferrique, et une fumure de fond pour toute culture.

#### RESUMEN

Los horizontes de acumulación de hierro de los « ferrisuelos xerotéricos » (Petroferric Ochraqualf) confieren sus características físico-químicas particulares a estos suelos. La génesis de dichos horizontes es al mismo tiempo actual y subactual. Es el resultado de la acumulación relativa y/o absoluta del hierro entre los horizontes « ócricos » (A1co) y « arcílicos » (Btg). Visto su repartición en los « solums » y su génesis, ligadas a los horizontes superior e inferior, el autor reconsideró el papel de estos horizontes en la taxonomía de los suelos marroquíes. Propone una definición, teniendo cuenta de los criterios morfo-analíticos y genéticos del horizonte petroférrico. Podría considerarse como horizonte diagnóstico, es decir como criterio de base para la clasificación de los suelos según « Soil Taxonomy » (1975).

La organización micromorfológica de este horizonte así que la naturaleza de sus elementos constituyentes sugieren su formación « in situ » por exportación de las arcillas « deshierradas » y por acumulación del hierro, regidas por la alternación de los procesos de oxidoreducción (ferrilisis).

De un punto de vista agronómico, la presencia del horizonte petroférrico a medio camino de los « solums » constituye una limitación seria para su valoración. Será preciso el drenaje, el desfondamiento del horizonte petroférrico y un abonado de fondo para todos los cultivos.

#### ABSTRACT

The horizons with iron accumulation of the xerotheric ferrisols (Petroferric Ochraqualf) give their specific physico-chemical properties to these soils. Their genesis is both recent and subrecent and results from the relative and/or absolute accumulation of iron in between the ochric (A1co) and argillic (Btg) horizons. Their distribution in the solums and their genesis, both of them linked to the upper and underlying horizons, have lead the author to reconsider the role of these horizons in the moroccan soil taxonomy. On morpho-analytical and genetic prounds he proposes a definition of the petroferric horizon.

The latter could be held back as a basic criterion for the classification of soils according to « Soil Taxonomy » (1975).

The micro-morphological organization of the petroferric horizon and the nature of its components suggest an in-situ formation by exportation of deferrified clay and by iron accumulation (ferrilysis), both of these processes being ruled by oxydo-reduction.

From an agronomic point of view, the presence of a petroferric horizon half-way the solum, constitutes a major limitation for soil reclamation. This indeed requires drainage, sub-soil ploughing of the petroferric horizon and a basic fertiliser for all crops.

TABLEAU 1

**Fer, alumine, silice combinée, silice totale et manganèse des « Fersiallites » (oolithes, pisolithes, concrétions) et des horizons pétroferriques continus et discontinus.**

Nomenclature	Dimen- sions φ en mm	Silice combi- née SiO <sub>2</sub> %	Alu- mine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fer Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Manga- nèse MnO <sub>2</sub> %	Somme des bases totales Σ	Rapports molaires (1)					Rapports molaires (2)				
							SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>
Oolithes et pisolithes	< 2	53.6	15.2	13.5	15.9	0.06	1.74	100	1.191	2.54	1.09	8.64	11.50	4.93		
Concrétions fines	2-10	60.2	14.5	5.8	17.9	0.46	1.14	100	4.24	2.15	1.42	21.88	11.09	7.36		
moyennes	10-20	54.4	10.9	7.1	26.5	0.18	0.92	100	2.61	1.09	0.77	15.64	6.56	4.62		
	20-50	40.4	20.6	15.6	17.7	1.01	4.69	100	2.24	3.09	1.29	6.54	9.03	3.79		
grosses	> 50	45.5	21.1	8.4	17.8	1.73	5.47	100	4.26	3.15	1.81	13.46	9.94	5.72		
Concrétion Epicarpe	15	54.1	16.8	16.6	10.7	1.32	0.48	100	1.71	4.17	1.21	7.74	17.60	5.13		
Endocarpe	35	45.5	11.8	11.6	28.6	0.66	0.83	100	1.72	1.09	0.67	8.38	5.32	3.25		
Horizon pé- troferrique discontinu	100-300	55.3	19.5	7.3	14.0	0.02	3.90	100	4.53	3.70	2.03	17.40	14.20	7.82		
continu	300-500	46.5	13.7	10.2	23.1	0.01	6.09	100	2.19	1.51	0.89	9.93	6.87	4.04		
Horizon pé- troferrique discontinu	400-600	50.0	20.5	7.7	16.5	1.11	2.19	100	4.51	2.94	1.75	15.53	10.13	6.13		
continu	+ 600	54.8	8.5	6.7	25.2	0.18	4.62	100	2.15	0.89	0.63	15.98	6.67	4.71		

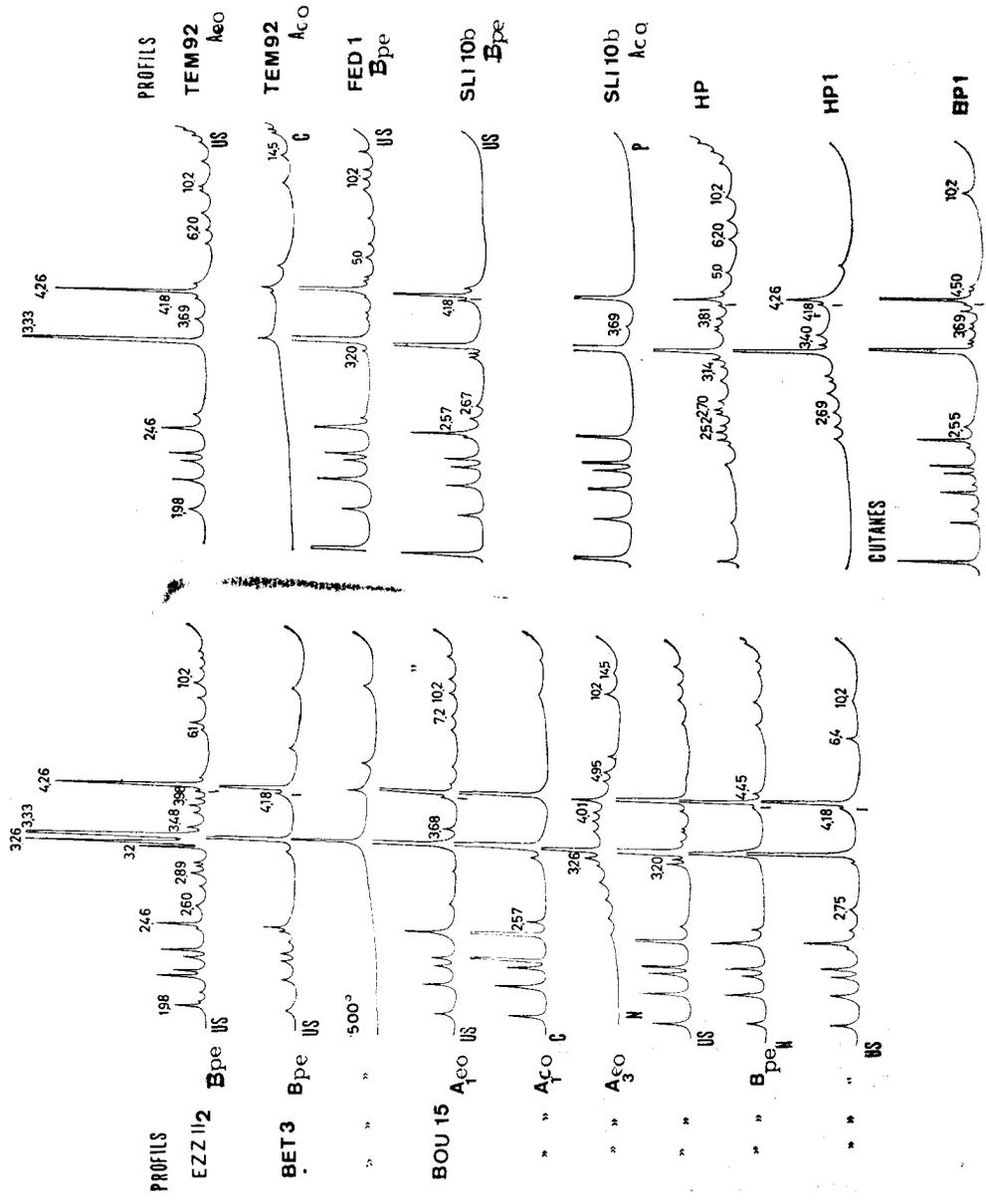
(\*) Par différence

1) SiO<sub>2</sub> combinée par les sesquioxydes

2) SiO<sub>2</sub> totale par les sesquioxydes.

FIG. 1

**Diagrammes de diffractions des R.X. des diverses formes d'accumulation de fer (oolithes, pisolithes, concrétions, carapaces et cuirasses).**

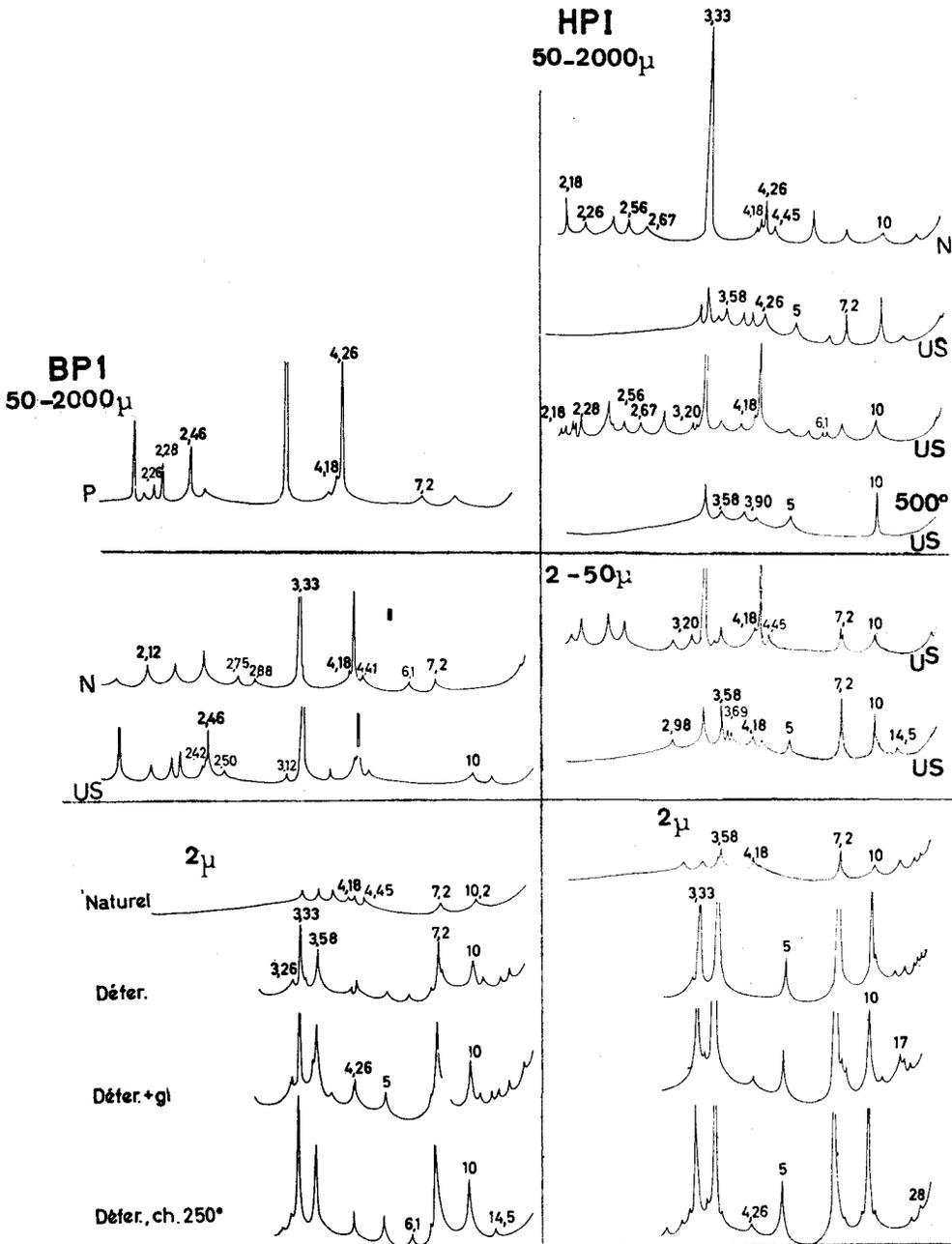


**Soils**  
 EZZ 11<sub>2</sub>: Ferrisol sur granite Bou 15 et BET 13: Ferrisols sur schistes et quartzites.  
 TEM 10, FED 1, SLI 10b: Sols ferrallitiques ferrugineux sur granite  
 HP<sub>1</sub>: cuirasse (Hauts-Plateaux)  
 BP<sub>1</sub>: cuirasse (Bas-Plateaux)

**Symbôles**  
 US: échantillons orientés dispersés aux ultrasons  
 P: échantillon en poudre  
 N: échantillon naturel  
 500°: échantillon naturel chauffé.

FIG. 2

Diagrammes de diffraction des R.X. de diverses fractions  
des horizons pétroferriques (ou cuirasses) fossiles



Symboles

HP1 : cuirasse des Hauts-Plateaux

BP1 : " Bas-Plateaux

P : poudre

N : échantillon naturel (orienté)

US : " dispersé aux ultra-sons

Défer: échantillon déferrié

Défer + Glyc.: échantillon naturel déferrié glycolé

Défer + ch. 250°: échantillon naturel déferrié chauffé à 250°.

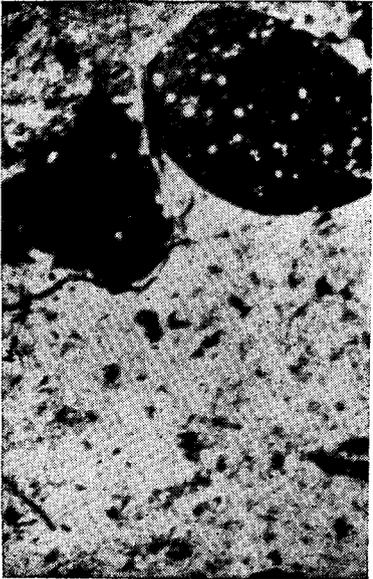
Micromorphologie des cutanes (sesquanes) et des glébu les sesquioxydiques (accumulations de fer et de mang.)



Ph. 1 : Sesquanes (manganés) diffus (L.N.; G x 60).



Ph. 2 : Sesquanes (ferranes) en « gouttelettes » disséminés dans un fond matriciel à plasma dominant (distribution porphyrique de l'horizon argillique) (L.N.; G x 40).



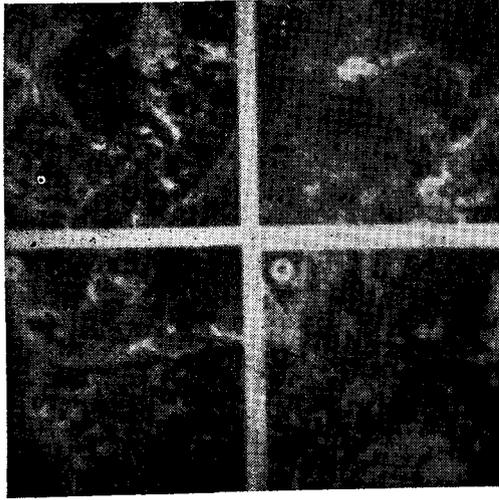
Ph. 3 : Nodules sesquioxydiques individualisés autour d'une section racinaire diffus et nodules sesquioxydiques arrondis (G x 40); L.P.



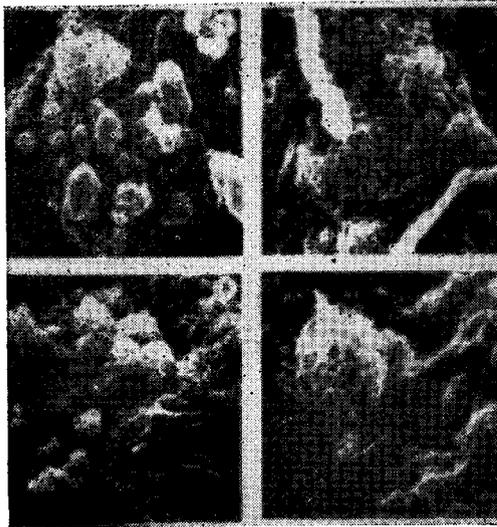
Ph. 4 : Glébu le sesquioxydique typique : composition interne : quartz dominant cimenté par des oxyhydrates de fer amorphes (G x 60); L.P.

PLANCHE 2

Clichés au microscope électronique à balayage (S.E.M.)  
des sesquanes et glébules sesquioxydiques



Ph. 1: sesquanes diffus tapissant les parois (7: G x 2.200 d'un macro-vide (cavités): G x 600) ou répartis sur les éléments pédiqes (9: G x 700 et 10 : G x 2200).



Ph. 2: oxyhydrates de fer amorphes (1: structure mamelonée: (G x 2.200) (2: idem: G x 30.000) (3 et 4: micro-structure en « nid d'abeille » (forme de « gruyère ») (G x 7.200 et 22.000).

Macro et micromorphologie de l'horizon pétroferrique



Ph. 1: Sol ferrugineux xérothérique (Ferrisoi: Petroferric Ochraqulf)

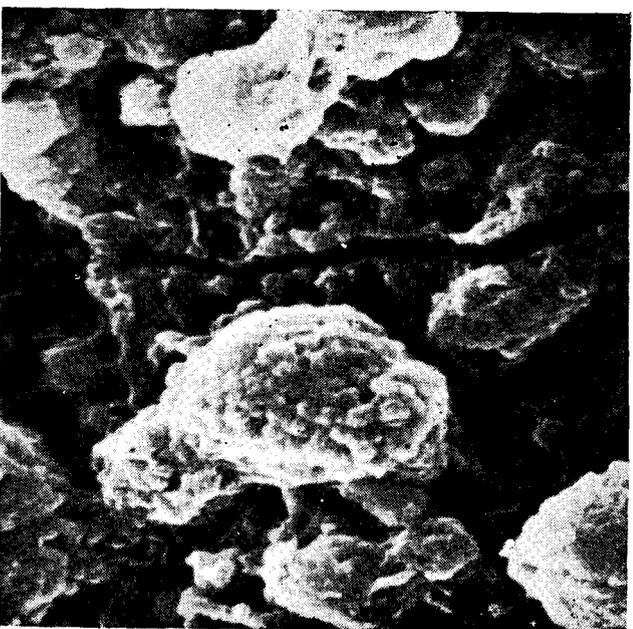


Ph. 2: glébulle sesquioxydique typique « concretion en « pelure d'oignon ». (G x 60)

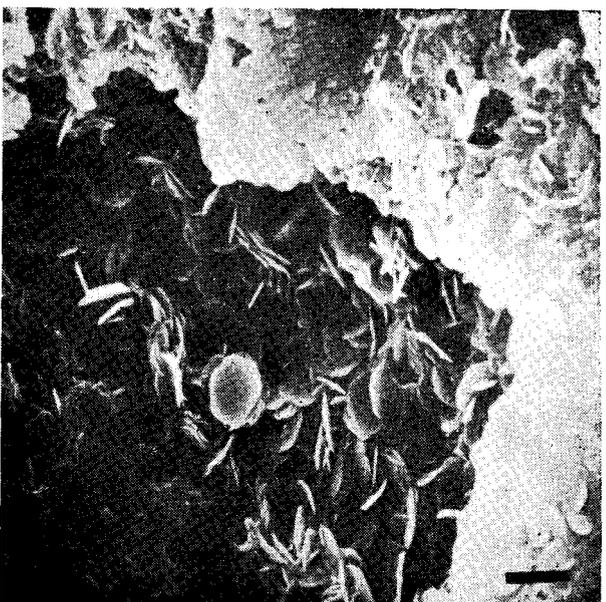


Ph. 3: distribution granulaire à intertextuelle de l'horizon pétroferrique glébulles sesquioxydiques (Clichés entre nicols partiellement croisés) (G x 40).

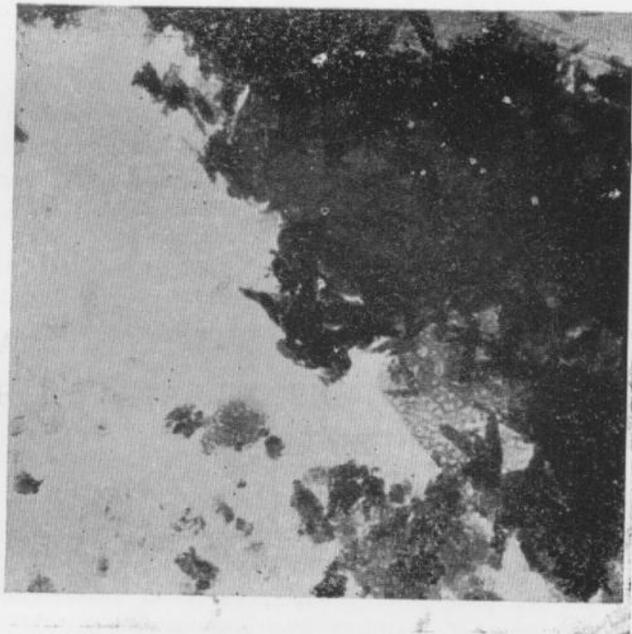
PLANCHE 4  
Micromorphologie des horizons pétroferriques



Ph. 1 : Globules « mamelonés » (Oxyhydroxates de fer amorphes (S.E.M. G x 5,500).



Ph. 2 : Goéthite aciculaire en « rosettes » dans un matricielle (S.E.M. G x 2,500).



Ph. 4: Goethite (aciculaire) (T.E.M. G x 53 000).

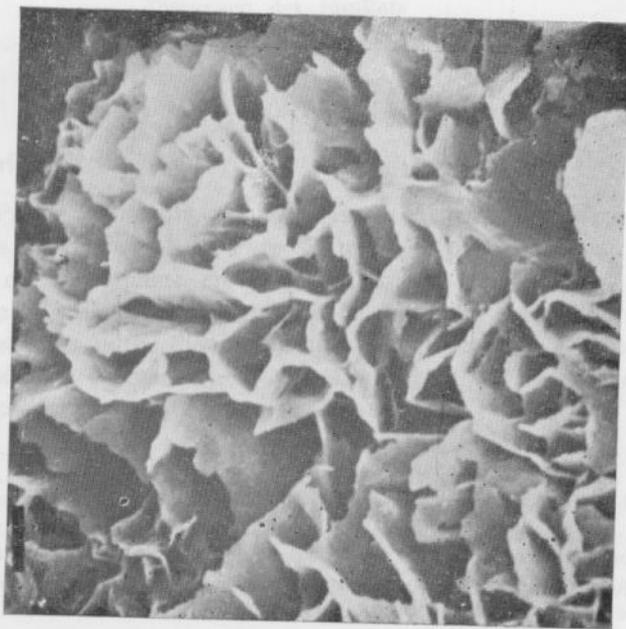


FIG. 3: Micro-structure en « nid d'abeilles » d'oxyhydroxides (Mn, Fe). Amorphes (S.E.M., G x 5.750).