

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LE COMPORTEMENT
GEOCHIMIQUE DES COMPOSES DU FER DANS DEUX SOLS TROPICAUX DANS
LA ZONE DE PASSAGE DU DOMAINE KAOLINIQUE AU DOMAINE MONTMORILLONITIQUE

par

C. TOBIAS *

-:-

I. - PRESENTATION ET MOTIVATION DE L'ETUDE

Après hydrolyse des minéraux primaires des roches, le fer est en grande partie libéré dans le sol, et deux possibilités s'offrent alors à lui :

Il reste en place, s'organise et trouve un équilibre avec les autres éléments minéraux et organiques avec qui il voisine.

- Si les conditions s'y prêtent, il migre dans le profil pédologique et même, à une échelle plus large, se déplace dans le paysage.

Le programme de recherches présenté ici se propose d'étudier les différentes situations que peut occuper le fer dans le cas précis d'une toposéquence fréquemment observée en Afrique tropicale sèche sur roche basique :

- Sols rouges tropicaux, ou bruns eutrophes, en position haute, de bon drainage.

- Vertisols à l'aval, en position de drainage difficile créant un milieu confiné.

- Entre ces deux types de sols s'observent des terres de passage (sols bruns ou rouges plus ou moins vertiques).

Cette toposéquence a souvent été décrite au Sénégal, Haute-Volta, Togo, Dahomey, Cameroun, sur roche basique ; on la connaît également en Afrique du Nord.

Elle représente une situation-clé de la géochimie du fer dans les sols tropicaux : sur de faibles distances, le seul facteur variable de la pédogenèse étant la topographie, on observe la juxtaposition de deux domaines fondamentalement différents du point de vue géochimique ; ceci aura des conséquences importantes dans le comportement du fer :

* ORSTOM, B. P. 1386, DAKAR (Sénégal).

- Dans les sols rouges c'est le domaine de la kaolinite, ou éventuellement d'un mélange kaolinite-montmorillonite.

- Dans les vertisols c'est le domaine pratiquement exclusif de la montmorillonite.

On est donc situé là dans une position privilégiée où les composés du fer évoluent suivant deux voies très différentes qu'il s'agit de préciser.

L'appellation "sols rouges" montre assez l'importance immédiate que peuvent présenter dans ces sols les oxydes et hydroxydes de fer ; cependant, dans les vertisols qui sont géographiquement très proches, on peut mesurer des teneurs en fer qui sont sensiblement voisines de celles des sols rouges ; la morphologie de ces sols est pourtant totalement différente.

Sur le plan scientifique, ce programme de travail est justifié pour plusieurs raisons :

1°) La toposéquence qui est l'objet de cette étude n'est pas un fait isolé, mais a un caractère général : elle se rencontre sur roche basique dans toute la zone à longue saison sèche de l'Afrique.

2°) Les connaissances concernant la géochimie de la silice et de l'aluminium dans les domaines kaolinique et montmorillonitique sont assez étendues, car ces deux éléments entrent directement dans la composition chimique des argiles. Par contre, paradoxalement pour un élément si abondant et répandu dans les sols tropicaux et méditerranéens, et dont les incidences pédologiques (propriétés physico-chimiques des sols) et géomorphologiques (modèle résultant de la mise en place de niveaux à concentrations ferrugineuses, cuirasses) sont parfois très grandes, les connaissances de la géochimie du fer sont moins avancées.

3°) Les différents aspects morphologiques que peut prendre le fer dans les sols (coloration, ségrégation en taches, concrétions, ...) sont utilisés comme des critères souvent essentiels dans la classification des sols, sans que l'on connaisse bien la causalité de ces différentes formes.

4°) Enfin, on a montré récemment (TRAUTH et al., 1967) que le fer peut participer directement à la géochimie des argiles (minéraux argileux ferrifères de type TOT).

Ce travail, qui pourra avoir un intérêt certain par son apport direct d'informations, représente surtout une ouverture sur les problèmes posés par le fer dans les sols et sera important par l'essai de mise au point d'une méthode générale d'étude qui manquait jusqu'ici ; cette méthode pourra être transposée par la suite à l'étude d'autres types de sols et de processus pédogénétiques.

II.- LES FORMES DU FER DANS LES SOLS

Nous rappelons brièvement que les différentes situations que peut occuper le fer dans un sol après altération des minéraux primaires des roches sont les suivantes :

1°) Formes minérales du fer

- Fer intégré dans un réseau cristallin de type silicaté :
 - . reliquat de minéraux primaires (et éventuellement accessoires : cas de la magnétite) dans un état d'altération plus ou moins poussé ;
 - . minéraux secondaires : argiles (de type montmorillonite).

- Fer libre : comprend "toutes les formes qui n'appartiennent pas aux minéraux primaires constitutifs des roches, ou à un minéral argileux, et qui relèvent de l'appellation oxydes et hydroxydes des amorphes ou cristallisés" ; on peut y adjoindre les formes complexées par la matière organique (SEGALEN, 1967). Les formes cristallisées, comprises dans le fer libre sont essentiellement l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et la goéthite ($\alpha\text{-FeOOH}$).

2°) Fer complexé à la matière organique

Sous forme de complexes ou de chélates, le fer lié à la matière organique fait partie en toute rigueur du fer libre, mais son importance physico-chimique dans les sols justifie qu'il soit traité à part.

III.- LES GRANDES LIGNES DU PROGRAMME

A.- Etablissement des données pédologiques de base

Dans un premier temps, l'étude sera réalisée sur deux toposéquences :

- une située dans le Sénégal-Oriental, choisie en fonction des travaux des géologues A. BLOT et J. M. WACKERMANN et des pédologues A. CHAUVEL et B. KALOGA ;
- une située dans le Nord-Cameroun, choisie en collaboration avec P. BRABANT et M. GAVAUD.

Le programme sera ensuite orienté en fonction des connaissances acquises sur ces deux toposéquences. Il sera étendu suivant le cas à des toposéquences analogues situées dans d'autres régions ou à des types de sols voisins permettant une compréhension plus large des résultats acquis.

Sur ces deux toposéquences, la description morphologique fine des sols et les analyses classiques seront réalisées selon les méthodes habituelles.

B.- Etudes des relations entre le fer et la granulométrie des sols

La répartition du fer dans les différentes fractions granulométriques et la nature des composés liés à chaque fraction est une des données importantes pour aborder ce travail. Cette étude se situe dans le contexte plus large d'une étude chimique et minéralogique des différentes fractions granulométriques.

L'ambiguïté du terme "argile" amène parfois une certaine confusion entre ce qui est "argiles minéralogiques" (c'est-à-dire les phyllites) et "argiles granulométriques" (c'est-à-dire les particules dont la taille est inférieure à 2μ). Les conséquences pratiques sont les suivantes :

1^o) Dans la fraction inférieure à 2μ peut se trouver, à côté des phyllites proprement dites, une proportion importante d'éléments fins de type oxydes et hydroxydes de fer, amorphes ou cristallisés, associés aux minéraux argileux.

2^o) Dans d'autres cas, les minéraux argileux peuvent se rencontrer dans une gamme granulométrique très large ; à ceci il y a 2 raisons possibles :

- Les minéraux secondaires se trouvent sous forme de particules monominérales ou d'assemblages polycristallins de grande taille : LELONG (1967) en Guyane Française, signale dans des formations latéritiques, la présence de vermicules de kaolinite de 0,5 à 1 mm, et des cristallites de gibbsite de 1 à 10μ . Ces particules de grande taille peuvent se développer à la place des minéraux primaires et sont particulièrement abondantes dans la zone d'altération constituant la roche-mère des sols bruns eutrophes .:

- Des particules de petite taille sont associées entre elles par des ciments de nature variable (ensemble mal connu organique - ferrugineux - alumineux - siliceux). Ces ciments s'opposent à la dissociation des particules élémentaires de taille inférieure à 2μ , qui se retrouvent dans des fractions plus grossières comme les limons et même les sables (cf. pseudo-sables des sols rouges de Casamance : CHAUVEL et MONNIER, 1967, CHAUVEL et PEDRO, 1967, CHAUVEL et FAUCK, 1969). L'analyse granulométrique classique donne des résultats qui sont en accord avec les propriétés physiques du sol, mais ne donne qu'une idée partielle de ce qui est la véritable composition élémentaire du sol.

Ces deux cas montrent la nécessité d'analyser le comportement, à l'échelle du profil de sol, de l'ensemble des minéraux argileux dans leurs différentes tailles, par rapport aux composés du fer, cristallisés ou amorphes, et de préciser leurs éventuelles interactions (dont la cimentation est un aspect).

La répartition du fer dans les différentes fractions granulométriques et la nature de leurs constituants pourront peut-être donner des renseignements sur le type et l'intensité de l'évolution des sols étudiés.

C.- Etude des relations entre le fer et les minéraux argileux

L'étude des relations fer-minéraux argileux représente le point central de l'ensemble du travail. Dans le type de toposéquence étudié, le contexte des minéraux argileux est tel qu'on peut définir deux grandes voies dans la géochimie du fer :

- En milieu kaolinitique, (sols rouges) le fer est essentiellement juxtaposé à l'argile, sous forme d'oxydes et hydroxydes libres qui déterminent notamment la couleur de ces sols.

- En milieu montmorillonitique, une certaine partie du fer est intégrée dans le réseau argileux pour former des minéraux ferrifères de deux types :

. famille de la montmorillonite : montmorillonite ferrifère par substitution en position octaédrique de Al par Fe⁺⁺⁺ et Mg⁺⁺ par Fe⁺⁺⁺
. famille de la beidellite : par substitution de Al par Fe⁺⁺⁺ en position octaédrique, on arrive à deux types de minéraux : beidellite ferrifère (Fe⁺⁺⁺ < 0,5 par ½ maille) et nontronite (Fe⁺⁺⁺ > 1 par ½ maille) -

En domaine montmorillonitique, une forme de fer juxtaposée, indépendante des minéraux argileux existe vraisemblablement aussi (présence occasionnelle de taches ferrugineuses dans certains vertisols) mais elle est très limitée et de nature probablement différente. Cette forme de fer peut être à relier à un taux faible de kaolinite dans ces sols.

Inversement, dans le domaine kaolinique, la possibilité d'une intégration du fer dans le réseau kaolinique, qui n'a pas été prouvée jusqu'à présent, n'est pas à exclure.

D.- Etudes des relations entre le fer et la matière organique

Il ne peut être question dans le cadre de ce travail d'aborder de manière détaillée le domaine des complexes organo-métalliques, complexes qui, dans cette toposéquence, ont une importance toute particulière. On limitera le travail à une approche très grossière permettant d'évaluer approximativement la quantité globale de fer qui entre en jeu dans ce processus, pour la situer par rapport à l'ensemble du fer et éventuellement de préciser le type de matière organique qui intervient dans le blocage de ce fer.

Dans ce domaine précis, la participation d'un spécialiste qui se consacrerait entièrement à ce problème serait du plus haut intérêt.

IV.- LES METHODES

A.- Quelques réflexions de départ.

Avant tout travail de laboratoire, il est indispensable de faire une mise au point terminologique et méthodologique sur tous les travaux antérieurs. En effet, on trouve une littérature assez abondante présentant des résultats souvent difficiles à relier entre eux, parfois même contradictoires.

De plus, il est bon de situer à sa juste valeur la notion de minéral, qui est bien précise pour un minéralogiste, mais qui représente une exception dans les sols : le pédologue sait que la goethite des sols est très éloignée de celle d'une collection de minéralogie ; de plus sa composition chimique peut varier dans certaines limites (goethites alumineuses).

B. - Méthodes d'extraction continue ; étude de la cinétique d'extraction des éléments.

Dans toutes les méthodes citées précédemment, l'extraction du fer se fait par action d'un réactif qui est mis en contact une fois avec le sol ; certains auteurs suggèrent de renouveler deux ou même trois fois cette opération, réunissent les deux ou trois fractions ainsi extraites pour déterminer une quantité globale de fer extrait, qu'ils essaient de relier à des propriétés particulières.

Trois séries de travaux ont permis d'aller plus loin dans ce domaine :

- RONDELET (1960) propose une extraction par l'acide oxalique 0,2N. Une différence importante avec les deux méthodes qui vont suivre, est que le solvant mis en contact avec l'échantillon est renouvelé de façon permanente (utilisation d'une micropompe) ; l'éluat est fractionné, et fer et aluminium sont dosés sur les fractions successives pour établir une courbe d'extraction.

- SCHEFFER, MEYER et BABEL (1961) utilisent $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ en présence d'un sel citrique. Ils traitent simultanément plusieurs exemplaires du même échantillon et arrêtent les traitements à des temps variables. Ils établissent des courbes d'extraction pour différents éléments en fonction du temps de contact des échantillons avec le solvant.

- SEGALEN (1968) traite le même échantillon alternativement avec de l'acide chlorhydrique 8 N à froid et de la soude 0,5 N à chaud. Cette opération est répétée 8 fois. On détermine fer, silice et alumine dans l'extrait chlorhydrique, alumine et silice dans l'extrait à la soude. Cette méthode permet de déterminer les produits amorphes des sols.

Dans ces trois méthodes, un pas important est franchi dans la conception de l'extraction chimique : de globale et uniquement quantitative qu'elle était, la technique d'extraction permet d'aborder un aspect qualitatif. Les courbes cumulées d'extraction permettent de visualiser le comportement de l'ensemble des éléments extraits par le solvant.

Ces éléments ne sont plus définis uniquement par une composition chimique ou minéralogique globale, mais surtout par un type de comportement.

Dans le programme qui est présenté ici, cette technique sera reprise et complétée par une étude de la cinétique de dissolution des éléments. L'application d'une méthode déjà ancienne d'analyse des courbes cumulées d'extraction (méthode de GUGGENHEIM 1926) permet à chaque instant de connaître les vitesse de réaction et les quantités de produit ayant une vitesse de dissolution déterminée (TOBIAS, 1969).

Trois avantages apparaissent :

mise en évidence de phases différentes que l'on peut apprécier quantitativement ;

- on peut attribuer à chaque phase une valeur chiffrée de sa vitesse de dissolution ; donc par comparaison de plusieurs résultats on peut essayer d'extrapoler à ce qui se passe dans la nature ;

- une investigation minéralogique assez précise est rendue possible en étudiant la courbe de dissolution du minéral.

Cette technique (*) sera appliquée à deux niveaux :

- Etude qualitative du fer libre : par traitement de l'ensemble du sol, on peut suivre l'évolution de la fraction fer libre (c'est-à-dire non silicaté) et la décomposer en plusieurs phases suivant son comportement à l'égard du réactif.

- Etude du fer intégré dans un réseau argileux : par application sur la fraction fine d'un échantillon de sol ayant subi une deferrification préalable (donc purifié de tout fer libre), de la technique préconisée par OSTHAUS (1953) aux Etats-Unis pour déterminer la localisation du fer dans un réseau argileux de type montmorillonite ferrifère, beidellite ferrifère et nontronite.

Par ailleurs, on utilisera la technique d'extraction globale préconisée par DE ENDREDY (1963) puis appliquée par SEGALEN (1967) pour obtenir des sols purifiés de tout fer libre sans que les minéraux secondaires soient affectés par ce traitement.

C.- Méthodes d'analyse granulométrique

L'aspect répartition et analyse des formes du fer en fonction de la granulométrie doit tenir une place importante dans ce travail, et il est nécessaire de connaître les limites et la signification des méthodes d'analyses granulométriques qui seront utilisées. En effet, dans les sols où la quantité de fer immobilisé est importante, l'agencement des éléments de la granulométrie est souvent différent de ce qu'il peut être dans d'autres sols ; dans ce dernier cas, les particules élémentaires sont en général à peu près toutes indépendantes les unes des autres, alors que dans les sols qui nous intéressent ici, le fer joue le rôle de ciment entre ces particules ; ce ciment a des forces de cohésion qui peuvent être très variables suivant les conditions de mise en place des oxydes et hydroxydes, suivant la composition chimique et minéralogique, etc...

(*) Un échantillon de sol de 7,5 g dilué dans 30 g de quartz calibré est placé dans une éprouvette de verre dans laquelle circule une solution de HCl 4 N ; le débit de cette solution est maintenu rigoureusement constant par une micro-pompe ; l'ensemble est maintenu à 25° dans un bain thermostaté. L'éluat est recueilli en totalité, et fractionné à l'aide d'un collecteur de fraction qui sépare les fractions obtenues dans des intervalles de temps égaux. On effectue sur chaque fraction le dosage de fer et aluminium.

Les résultats des analyses granulométriques pourront donc être extrêmement variables suivant les méthodes utilisées, suivant les réactifs qui entrent en jeu dans la dispersion. Les variations de l'état granulométrique d'un même échantillon au cours de ces traitements, la comparaison des résultats obtenus sur une série d'échantillons d'un profil ayant subi différents traitements, pourront donner d'importantes indications sur la nature et le mode d'action des ciments ferrugineux. Cette partie du programme s'appuiera essentiellement sur les travaux effectués par A. CHAUVEL (1967 et 1969) sur les sols de Casamance ; cependant les techniques utilisées, mises au point pour des sols faiblement ferrallitiques sur Continental Terminal, devront probablement être réajustées en fonction des sols que nous étudions.

Trois méthodes sont proposées, qui analysent plutôt un type de comportement qu'une composition chimique ou minéralogique déterminée ; cette notion a déjà été évoquée à propos de l'étude du fer libre par la cinétique de dissolution.

1°) Traitement doux, par H_2O_2 "electro" qui, par un effet de dissociation très modéré, permet la mise en suspension d'une fraction particulière du plasma, dont les forces de cohésion sont très faibles. Les effets de ce traitement ont été vérifiés par examen micromorphologique.

2°) Traitement par le réactif de Tamm à l'obscurité, dont l'effet de dissociation est bien plus poussé et permet de dégager des minéraux propres ; il y a une dissociation poussée pour une dissolution chimique faible. Ce deuxième traitement permet notamment une excellente préparation du matériel pour la séparation de la magnétite dans la fraction sableuse.

3°) Dissolution totale des éléments ferrugineux par une méthode franchement agressive : action d'un réducteur puissant qui permet la libération de tous les minéraux primaires et secondaires du sol (méthode de JEFFRIES 1946).

Ces trois méthodes, dont l'application est assez longue, ne seront appliquées qu'à quelques échantillons de profils caractéristiques.

o o

Dans toutes les opérations précédentes, les produits séparés par analyse granulométrique, ou résiduels après une opération de dissolution, seront analysés par les Rayons X ou par Analyse Thermique Différentielle pour suivre l'évolution des fractions minérales (argiles et oxydes - hydroxydes).

La réalisation de ce programme a été commencée en Janvier 1971.

Références bibliographiques

- CHAUVEL (A.), MONNIER (G.) 1967 - "Sur la signification générale de l'analyse granulométrique en Pédologie ; examen de problèmes posés par la caractérisation de la texture de certains sols tropicaux". C. R. Acad. Sc. Paris, t. 264, série D, pp.1969-1972
- CHAUVEL (A.), PEDRO (G.) - 1967 - "Considération sur l'analyse granulométrique et le problème de la détermination de la constitution minéralogique élémentaire de certains sols tropicaux ; nécessité et limites de la déferrification" C. R. Acad. Sc. Paris, t. 264, série D, pp. 2089-2092
- CHAUVEL (A.), FAUCK (R.) - 1969 - "Sur la mise en évidence et la caractérisation d'un horizon B dit "de comportement" dans les sols rouges de Casamance (Sénégal)". C. R. Acad. Sc. Paris, t. 269, série D, pp. 2080-2083.
- ENDREDY (A. S. de) - 1963 - "Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method". Clay Miner. Bull., 29, 5, pp 209-217.
- GUGGENHEIM (E. A.) - 1926 - "On the determination of the velocity constant of a unimolecular reaction". Phil. Mag., I, note n° XLVI, pp 538-543.
- JEFFRIES (C. D.), 1946 - "A rapid method for the removal of free iron oxides ion soil prior to petrographic analysis". Soil Sc. Amer.Proc., 11, pp. 211-212.
- LELONG (F.) - 1967 - "Sur les formations latéritiques de Guyane française : "manière d'être" de la kaolinite et de la gibbsite ; origine des phyllites micacées". C. R. Acad. Sc. Paris, t. 264, série D, pp. 2713-2716.
- OSTHAUS (B. B.) - 1953 - "Chemical determination of tetrahedral ions in nontronite and montmorillonite" Clay and clay minerals, 2 nd Nat. Conf. pp. 404-417.
- RONDELET (J. A.) - 1960 - "Caractérisation des différentes formes de l'aluminium et du fer dans les sols tropicaux". C. R. 3ème Conf. Interafric. des sols, Dalaba, pp. 177-189.
- SCHEFFER (F.), MEYER (B.), BABEL (U.) - 1961 - "Zur qualitativen Erfassung der freien Eisenoxyde in Böden mittels Extraktionsverfahren" Zeitschrift Pflanzonernährung, Düngung, Bodenkunde, T 95, n° 11, pp. 142-160
- SEGALEN (P) - 1967 - "Problèmes posés par la détermination du fer libre dans les sols à sesquioxydes". Document multigraphié provisoire, Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, Bondy, 24 p.
- SEGALEN (P.) - 1968 - "Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux". Cahiers ORSTOM, série Pédologie, Vol. VI n° I pp 106-126.
- SEGALEN (P.) - 1970 - "Extraction du fer libre des sols à sesquioxydes par la méthode de DE ENDREDY par irradiation à l'ultra-violet de solutions oxaliques". Document multigraphié provisoire, Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, Bondy, 15 p.

- TOBIAS (C.) 1969 - "Traitement acide de quelques sols tropicaux. Etude de la cinétique d'extraction des composés du fer, de la silice et de l'alumine". Document multigraphié provisoire, Centre ORSTOM de DAKAR, 36 p.
- TRAUTH (N.), PAQUET (H.), LUCAS (J.), MILLOT (G.) - 1967 - "Les montmorillonites des vertisols lithomorphes sont ferrifères : conséquences géochimiques et sédimentologiques". C. R. Acad. Sc. Paris, t. 264, série D. pp. 1577-1579.

COMITE TECHNIQUE DE PEDOLOGIE

BULLETIN DE LIAISON

du

THEME B

Numéro 1

Juin 1971

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER

SOMMAIRE

Avant-Propos, par A. Ruellan	3
Le thème B, par A. Ruellan	7
Le thème B en Haute-Volta et au Togo. Etat d'avancement des recherches de R. Boulet, B. Kaloga, J.C. Leprun, A. Lévêque. Compte-rendu, par A. Ruellan	11
Programme d'étude typologique et gé- nétique de sols sableux, par M. Gavaud	25
Programme d'étude typologique et gé- nétique de deux types d'association de sols sur les granito-gneiss du bassin de la Bénoué, par P. Brabant	39
Cadre général des programmes de recherche entrepris au Dahomey, par D. Dubroeuq, P. Faure et M. Viennot...	51
Programme de recherche sur le compor- tement géochimique des composés du fer dans deux sols tropicaux dans la zone de passage du domaine kaolinique au domaine montmorillonitique, par C. Tobias	59

