

La formation et l'évolution des complexes organo-minéraux dans les sols et leur rôle dans la pédogénèse

Philippe DUCHAUFOUR(*)

RÉSUMÉ

L'auteur rappelle les différentes voies de l'humification : héritage ou transformation limitée des composés originels de la litière ; néoformation d'une part des composés humiques (acides fulviques et humiques, humine évoluée), d'autre part des différentes formes de biomolécules.

La première partie concerne le rôle des complexes organo-minéraux dans la formation et l'évolution des structures. La seconde partie a trait à l'action du milieu sur l'humification : le rôle du pédoclimat, du matériau d'origine, notamment du cation dominant, celui de la végétation, sont successivement passés en revue.

La dernière partie de l'article a pour objectif de montrer comment les complexes organo-minéraux interviennent dans les quatre principaux types de pédogénèse tempérée : brunification, podzolisation, andosolisation, mélanisation, ainsi que de certaines formes de pédogénèse liées à l'intervention simultanée de plusieurs processus (sols "intergrades").

MOTS-CLÉS : humification - complexes organo-minéraux - mull - moder - dysmoder - mor - brunification - podzolisation - andosolisation - mélanisation

FORMATION AND EVOLUTION OF ORGANO-MINERAL COMPLEXES AND THEIR ROLE ON PEDOGENESIS

The author recalls the different modes of humification : "inheritance" or limited transformation of the litter components ("inherited humin"), neoformation of both humic compounds (fulvic acids, humic acids, a part of the humin) and biomolecules (Fig. 1).

The first part of the article concerns the role of the organo-mineral complexes in the building of the structures. The action of each kind of organic fractions has been thus reviewed : (1) the soluble or pseudosoluble precursors of humic compounds in the podzols ; (2) the little polymerized humic compounds of the brown soils ; (3) the much transformed old humic compounds ; (4) the different kinds of biomolecules.

The second part of the article deals with the influence of the environment on the formation of the organo-mineral complexes : (1) pedoclimate, with more or less contrasting seasons ; the alternation of wetting (freezing) and drying has an opposite action on the

(*) 8, allée de la Doucerie - 78620 L'Étang-la-Ville.

evolution of humic compounds and on that of biomolecules ; (2) composition of the parent material is the main factor in atlantic climate : a "pilot cation" bound to clay induces a certain mode of humification. Iron hydroxide brings about a mesotrophic mull on granite or sandstone ; aluminium hydroxide favours an andic mull on volcanic parent material ; calcium cation, acting either under the solid form of calcium carbonate or under the soluble cationic form, induces the formation of the big composite aggregates of the carbonate or calcic mull ; (3), vegetation, according to the nature of the litter, slows down or accelerates the main process of pedogenesis.

The last part of the article formulates a general conclusion and reviews the four main processes of temperate pedogenesis in permeable media : brunification, podzolisation, andosolization, melanization, taking account of the processes called "intergrades".

KEY-WORDS : humification - organo-mineral complexes - humus - brunification
podzolisation - andosolization - melanization.

INTRODUCTION

Malgré leur complexité, les processus d'humification qui président à la transformation des litières en composés nouveaux, dits "humiques", commencent à être mieux connus, grâce au travail de multiples équipes de recherche qui utilisent des méthodes et des moyens très modernes. Schématiquement, on peut admettre qu'il existe deux grandes voies de l'humification : l'une, qui procède d'un héritage, ou d'une transformation limitée des constituants originels de la litière ; l'autre, dite "néoformation", qui passe par deux phases : décomposition des constituants originels et libération de composés à plus faible poids moléculaire ("précurseurs"), puis édification de nouvelles structures par polymérisation, aux dépens de ces "précurseurs" (Fig. 1).

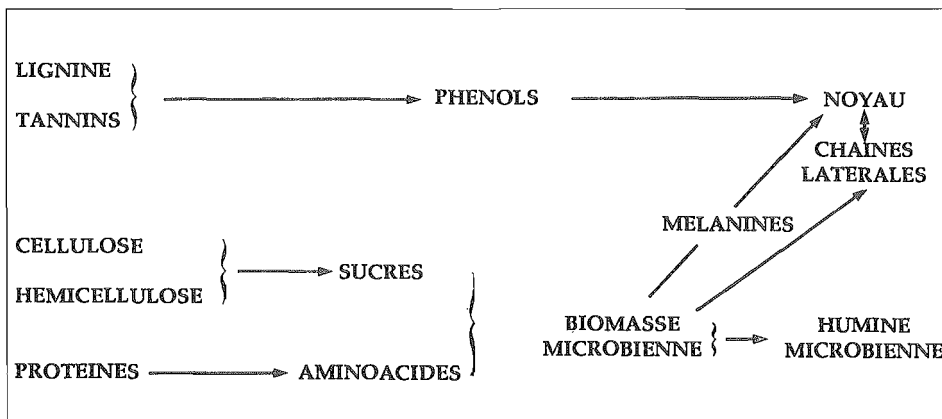


Figure 1 : Humification par néoformation
Humification by neoformation

Cette néoformation présente elle-même deux aspects : un aspect biochimique, qui est à l'origine des composés humiques au sens strict, dont la majorité est extractible (acides

fulviques et humiques) (DELECOUR et PRINCE-ABODJAN, 1975), et un aspect plus strictement biologique, qui concerne la formation des "biomolécules", notamment polysaccharides, (JOCTEUR-MONROZIER, 1984), en majorité non extractibles et désignées souvent par l'expression "humine microbienne".

Cet exposé sera divisé en trois parties : la première concernera le rôle des constituants organiques dans l'édification des structures, la seconde, l'influence des conditions de milieu sur leur formation et leur évolution ; la troisième enfin tentera de montrer le lien qui existe entre les complexes organo-minéraux, leur dynamique dans le sol et les processus généraux de la pédogénèse.

I. ORIGINE DES CONSTITUANTS ORGANIQUES, LEUR ROLE DANS L'ÉDIFICATION DES STRUCTURES

Seront examinés successivement, les trois grands modes d'humification : héritage, néoformation humique, néoformation biologique.

A) HÉRITAGE ET TRANSFORMATION MODÉRÉE

Les "humines héritées", encore proches de la matière organique végétale sont surtout abondantes aux deux pôles de l'activité microbienne. Dans les milieux très actifs, saturés en calcium, elles constituent une fraction non négligeable de la fraction organique, mais, à la différence des mor et moder, elles sont intimement mélangées à la matière minérale par l'activité biologique : elles constituent alors une part importante des gros agrégats qui caractérisent ces milieux riches en calcium. Dans les milieux peu actifs (mor, moder, surtout dysmoder), elles constituent la majeure partie de l'horizon organique qui surmonte le sol minéral. Dans ces derniers humus, il n'y a pas formation de véritables agrégats argilo-humiques ; l'humine héritée constitue la majeure partie de la "matière organique fine", qui caractérise les horizons O_h (BABEL et MEYER, 1987) et se trouve incluse dans les boulettes fécales des enchytraéides ou des arthropodes inférieurs (TOUTAIN, 1981).

B) NÉOFORMATION DES COMPOSÉS HUMIQUES AU SENS STRICT

Ces composés sont formés de "noyaux polyaromatiques", tridimensionnels reliés par des chaînes aliphatiques, schéma confirmé par ANDREUX (1978), MCKEAGUE *et al.* (1986). Ils résultent de l'insolubilisation et de la polymérisation des précurseurs, plus ou moins rapides suivant les conditions de milieu. Leur évolution varie considérablement, non seulement d'un type d'humus à l'autre, mais même au sein des différentes fractions d'un même humus. Nous passerons en revue trois cas :

● Composés humiques des dysmoder et des mor

Ces humus sont caractéristiques des sols podzolisés. Dans ces milieux, les deux phases "formation des précurseurs", "insolubilisation et polymérisation" sont, pour la majorité d'entre eux, séparées dans l'espace. Parmi les précurseurs, les composés phénoliques jouent un rôle particulier. Ils ne s'insolubilisent que très progressivement, ce qui favorise la formation de complexes mobiles à base d'aluminium et de fer, et provoque leur entraînement. Ils s'insolubilisent en profondeur, provoquant la formation des horizons dits "spodiques". D'après DE CONINCK *et al.* (1974) et ROBIN (1979),

ces horizons présentent deux types de structure : (1) la structure "polymorphe", qui caractérise les horizons spodiques les plus actifs biologiquement et dont le "turnover" est encore rapide (présence de boulettes fécales), (2) la structure monomorphe, d'origine purement chimique, formant les horizons cimentés, souvent durcis (alios) des podzols les plus anciens et les plus évolués.

● Composés humiques des mull mésotrophes (sols brunifiés)

Dans ces milieux biologiquement actifs, les deux phases de l'humification ne sont plus séparées dans l'espace, mais interviennent l'une et l'autre au sein des horizons de surface. Les hydrates de fer et d'aluminium, s'ils sont en quantité suffisante, insolubilisent les précurseurs et jouent le rôle de cation de liaison à l'égard des argiles (ou des allophanes, dans les andosols), formant ainsi des agrégats qui s'opposent aux migrations (sauf celle des argiles fines sur certains matériaux). Les composés humiques encore peu polymérisés, et riches en chaînes aliphatiques, restent assez labiles, de sorte que les structures se détruisent, mais aussi se reconstruisent périodiquement grâce à la forte activité biologique (TOUTAIN, 1981).

● Composés humiques stables

Ils n'apparaissent dans les sols que très progressivement, lorsque les conditions de milieu sont favorables : les chaînes aliphatiques diminuent d'importance, alors que les noyaux prennent une forme de plus en plus polycondensée (BARRIUSO, 1985, SKJEMTAD et DALAL, 1987). Ils se rapprochent des sphérocolloïdes décrits par SCHLICHTING (1986). JOCTEUR-MONROZIER (1984) a montré le rôle "traceur" de l'azote : au cours de cette évolution vers les formes humiques stables, l'azote protéique disparaît au profit de l'azote "humique" ; ces composés prennent une teinte sombre (acides humiques gris et humine "évoluée").

Selon SCHLICHTING (1986), les composés humiques stables sont d'autant moins efficaces pour l'édification des structures qu'ils sont plus évolués, donc plus condensés. Les chaînes aliphatiques sont, en effet, de plus en plus courtes ; les zones de contact entre les noyaux condensés et la surface des argiles sont moins importantes que celles des gels microbiens, qui, d'une part sont doués d'un fort pouvoir adhésif, d'autre part revêtent la surface la plus large des cristaux d'argile. De ce fait, les liaisons entre ces composés humiques et les argiles peuvent être facilement rompues par les agents extérieurs, surtout si les biomolécules sont présentes en quantité insuffisante dans le milieu. C'est ce qu'a noté BALESDENT (1982), qui a montré que les composés humiques les plus stables des sols lessivés sont entraînés en même temps que les argiles. Par ailleurs, FAIVRE (1988) a fait une constatation analogue en ce qui concerne les planosols de Colombie : lorsque les biomolécules sont biodégradées, argiles et composés humiques évolués (de couleur noire) sont entraînés simultanément et s'accumulent dans un horizon "argilique" très foncé.

C) NÉOFORMATION DES BIOMOLÉCULES

Les biomolécules sont étroitement liées à l'activité de la biomasse microbienne, qui, selon GUCKERT (1973), est en relation directe avec le pH et la richesse en azote. Leur rôle dans l'édification des structures est essentiel : FAIVRE (1988) a pu mettre en évidence la relation existant entre la perte de la stabilité structurale et la disparition des

polysaccharides dans les toposéquences colombiennes.

Comme l'ont montré OADES (1986), COLEMAN et ELIOTT (1986) et plus récemment BARTOLI *et al.* (1988), les biomolécules interviennent à deux niveaux dans l'édification des structures : certaines constituent le ciment de microagrégats ($d < 50 \mu\text{m}$), rassemblés à leur tour par d'autres biomolécules en macroagrégats ($d > 200 \mu\text{m}$). D'après TIESSEN et STEWART (1986), les ciments des microagrégats sont des gels bactériens qui revêtent la surface des argiles : ils semblent correspondre aux humines organo-argiliques de BRUCKERT et KILBERTUS (1980). Quant aux macroagrégats, ils seraient formés par l'intervention de molécules à longues fibres et d'hyphes mycéliens constituant un véritable réseau, qui réunit entre eux les microagrégats. Les microagrégats se montrent plus stables que les macroagrégats, qui ne résistent pas au travail intensif du sol (GUPTA et GERMIDA, 1987). Là encore, les cations (calcium) et hydroxydes jouent le rôle, comme pour les composés humiques, de "cations de liaison" entre biomolécules et argiles. Les structures des milieux riches en calcium et en azote sont donc très complexes, et constituées d'agrégats grumeleux beaucoup plus gros que ceux des sols acides. La faune du sol (notamment les lombrics) exerce une action permanente et efficace dans le maintien et éventuellement la reconstitution de ces structures grumeleuses (TOUTAIN, 1981).

II. ACTION DES FACTEURS DU MILIEU SUR LA FORMATION ET L'ÉVOLUTION DES COMPLEXES ORGANO-MINÉRAUX

Trois facteurs du milieu jouent un rôle essentiel : le pédoclimat, la composition du matériau d'origine, la végétation.

A) LE PÉDOCLIMAT

Bien mise en évidence par les expériences de NGUYEN-KHA (1973) à propos des vertisols, l'importance des contrastes saisonniers du pédoclimat a été récemment démontrée par FAIVRE (1988) à propos des planosols de Colombie : ces sols à structure dégradée, situés à l'aval des chaînes de sols, s'opposent aux andosols et aux brunizems de l'amont, dont la structure est conservée par l'absence de saison sèche.

Les alternances de saisons sèches et humides agissent de façon opposée sur les biomolécules et sur les composés humiques au sens strict. Les biomolécules sont rapidement détruites dans les sols à pédoclimat contrasté ; on le savait depuis longtemps pour les chaînes peptidiques. FAIVRE (1988) a montré que cette observation est aussi valable pour les polysaccharides.

Le comportement des composés humiques est bien différent. Les contrastes saisonniers provoquent l'amenuisement des chaînes latérales, mais favorisent la polycondensation des noyaux. Le taux d'aromatation, ou "benzoid index" selon ORLOV *et al.* (1987), augmente corrélativement et atteint une valeur maximale dans les chernozems (42 %), alors qu'il ne dépasse guère 13,8 dans les sols bruns tempérés, formés en climat atlantique peu contrasté. Les composés humiques ainsi formés sont très stables, leur temps moyen de résidence peut atteindre plusieurs milliers d'années. Leur évolution lente, appelée parfois maturation, peut être considérée comme une véritable "stabilisation climatique". Ce sont eux qui colorent en noir les horizons d'accumulation B_t des planosols colombiens (FAIVRE, 1988). Par contre, ils restent minoritaires dans

les sols bruns tempérés, et semblent accompagner les argiles fines dans leur migration (horizons "argiliques" des sols bruns lessivés (BALESDENT, 1982).

B) ROLE DE L'ARGILE ET DES CATIONS

Dans les climats tempérés atlantiques, à saisons peu contrastées, ce sont les cations, calcium, fer, aluminium, plus ou moins étroitement associés à l'argile, qui exercent l'influence la plus importante sur l'humification. Ils insolubilisent les précurseurs, favorisent éventuellement leur polymérisation et les protègent, avec une efficacité variable, contre la biodégradation : ils agissent en tant que "stabilisateurs physico-chimiques".

● *En ce qui concerne les roches silicatées*, les agents d'insolubilisation qui jouent le rôle principal sont les hydroxydes de fer et d'aluminium, associés aux argiles (ou éventuellement aux allophanes). Les hydroxydes de fer l'emportent sur des matériaux tels que les grès, les hydroxydes d'aluminium sur les matériaux volcaniques très divisés. Les formes actives sont les formes amorphes ou mal cristallisées (JEANROY, 1983). Les travaux de SOUCHIER (1971), VEDY (1973), TOUTAIN (1974) et HERBAUTS (1981) comparant entre eux divers types de granites ou de grès, ont montré qu'il existait, pour une roche-mère déterminée, un véritable seuil de teneur en fer orientant la pédogénèse, soit vers la brunification, soit vers la podzolisation. Il faut noter que les deux hydroxydes concernés ont une action insolubilisatrice assez comparable sur les précurseurs, mais qu'ils s'opposent du tout au tout en tant que "stabilisateurs", l'alumine se montrant à ce point de vue beaucoup plus efficace que les hydrates de fer (HETIER, 1975 ; ANDREUX, 1978) : le turnover des composés humiques est beaucoup plus rapide dans les sols bruns acides que dans les andosols.

● *En ce qui concerne les roches carbonatées*, c'est évidemment l'ion calcium qui joue le rôle déterminant : il favorise l'humification à un stade précoce, mais freine la minéralisation de tous les constituants ; il se comporte donc en stabilisateur efficace. Par ailleurs, élevant le pH, il stimule l'activité microbienne, de sorte que l'humine microbienne est abondante. Mais la ligninolyse est ralentie, comme le souligne HAIDER (1986), de sorte que l'humine héritée prend aussi une certaine importance dans les milieux saturés. Au total, les gros agrégats à structure complexe décrits plus haut comportent, en quantité sensiblement équivalente, les trois éléments : humine microbienne, humine héritée, composés humiques au sens strict.

Mais il est désormais possible d'aller plus loin, en s'appuyant sur des recherches récentes : il convient de distinguer l'action du "calcaire fin précipité", agissant à l'état solide, de l'action du calcium en solution qui, sous certaines conditions, peut être abondant, même en l'absence de calcaire actif (sols humo-calciques de montagne : BALESDENT, 1982, BRUCKERT *et al.*, 1986 ; GAIFFE, 1987).

Le calcaire fin, reprécipité après dissolution, absorbe les précurseurs (ici de type aliphatique dominant), sous la forme d'acides fulviques, et freine toute transformation ultérieure, comme l'ont montré MULLER et VEDY (1978), JACQUIN *et al.* (1980), INSKEEP et BLOOM (1986). Quant au calcium en solution, son efficacité atteint son maximum en montagne, dans les milieux aérés, sur calcaires très fragmentés (sols humo-calciques). Dans de tels milieux, l'humification est plus poussée, la polycondensation des noyaux humiques s'accroît, et l'ensemble du profil prend une teinte noire.

C) LA VÉGÉTATION

Depuis longtemps, forestiers et écologistes opposent les espèces forestières dites "améliorantes" à celles qui sont "acidifiantes". Les premières fournissent des litières riches en azote et à composés très fermentescibles : elles ont tendance à donner du "mull" (MANGENOT et TOUTAIN, 1980). Les secondes, au contraire, sont pauvres en azote et certains de leurs composants (lignine, cutine, lipides, composés phénoliques antimicrobiens), selon BERTHELIN (1976), ralentissent la décomposition des litières, qui évoluent vers un moder ou un mor. En règle générale, les feuillus sont moins acidifiants que les résineux et les éricacées.

Ces propriétés des litières ont un grand retentissement sur le cycle biogéochimique des nutriments : en particulier, les espèces améliorantes favorisent le stockage de l'azote, du calcium, du manganèse, même sur les matériaux d'origine pauvre et acide (VEDY, 1973). Le pH s'élève et les éléments ainsi accumulés en surface favorisent, à leur tour, l'humification.

En fait, il y a interférence entre la composition des litières et celle du matériau minéral. Laquelle joue le rôle principal ? Il semble que le matériau d'origine oriente le processus de façon décisive, mais que la végétation exerce une action retardatrice, ou au contraire accélératrice du processus. C'est ainsi que sur des grès ou des sables très favorables à la podzolisation, on observe la formation de podzols aussi bien sous feuillus que sous bruyères. Inversement, d'après BONNEAU (1985), NYS et RANGER (1985), NYS (1987), la plantation de résineux acidifiants sur des matériaux d'origine "résistants" à la podzolisation, n'a pas sensiblement modifié le profil après cinquante ans : on observe seulement la formation d'un moder en surface, accompagnée d'une certaine libération et mobilisation d'aluminium libre.

La comparaison de podzols formés sur un même matériau mais sous deux types de végétation, hêtraie ou bruyères, s'avère très significative : elle a été effectuée par GUILLET (1972) sur grès vosgien, par ROBIN (1979) sur sables stampiens du Bassin Parisien et par HERBAUTS (1981) sur grès du Luxembourg. Alors que le podzol sous feuillus est peu différencié et caractérisé par un B_h peu humifère, à turnover rapide, le podzol sous bruyères offre des horizons très contrastés, à B_h de couleur noire : cet horizon, qui est la "signature" de la callune, est formé par la polycondensation de phénols (catéchol) très résistants à la biodégradation. Les acides humiques de cet horizon sont pratiquement inertes et sont caractérisés par un temps moyen de résidence (^{14}C) de plusieurs milliers d'années ; ces horizons évoluent vers les alios humiques à structure pelliculaire (GUILLET, 1972 ; voir aussi GUILLET, *in* RIGHI et CHAUVEL, 1987).

III. CONCLUSION ET SYNTHÈSE :

Relations entre la pédogenèse et l'évolution des complexes organo-minéraux en climat tempéré.

Trois processus fondamentaux permettent de définir la pédogenèse : l'humification, l'altération, les mouvements de matière. Ces trois processus se conditionnent mutuellement et sont étroitement liés à l'évolution des complexes organo-minéraux, au moins dans les sols tempérés : ils sont donc en relation avec les structures et les propriétés fondamentales du sol. Ces relations ont pu être mises en évidence par divers auteurs :

TOUTAIN (1974), HERBAUTS (1981) et récemment, ROBERT et BERTHELIN (1986). Nous passerons en revue les quatre principaux aspects de la pédogénèse tempérée : Brunification, Podzolisation, Andosolisation, Mélanisation, sans oublier les cas particuliers et les "intergrades".

A) BRUNIFICATION

Ce processus est lié aux mull mésotrophes, à turnover rapide. Décrit par SCHLICHTING (1986), KUNTZE *et al.* (1988) en RFA, ainsi que par UGOLINI (1986) aux USA, il a, en France et en Belgique, fait l'objet d'études approfondies de SOUCHIER (1971) sur granite, TOUTAIN (1974) et HERBAUTS (1981) sur grès. Le rôle du fer libre lié à l'argile apparaît comme prépondérant dans ce processus.

Certaines formes très acides de sols brunifiés peuvent être considérées comme des intergrades podzoliques : elles sont liées à une modification de l'humus, qui évolue vers un moder. On peut admettre qu'il s'agit d'une étape initiale de la podzolisation, dans laquelle l'ion Al^{3+} migre à l'état ionique et non complexé (UGOLINI et DAHLGREN, *in* RIGHI et CHAUVEL, 1987). Selon BOURRIÉ et GRIMALDI (1979), BONNE (1981) et GRAS *et al.* (1988), la forme de migration principale serait la forme nitrique. Les sols bruns acides (surtout ocreux), les sols lessivés acides, constituent de bons exemples de ces formes transitoires.

B) PODZOLISATION

Ce processus, souvent décrit, a fait l'objet d'un colloque exhaustif à Poitiers (RIGHI et CHAUVEL, 1987). Parmi les exposés les plus complets sur la podzolisation, on peut citer ceux de MCKEAGUE *et al.* (1983), SOUCHIER (1984). Rappelons seulement que ce processus intervient en climat tempéré atlantique sur milieu quartzeux très filtrant, sous l'influence d'un humus très acide et biologiquement peu actif (dysmoder ou mor, en particulier mor de bruyères).

C) ANDOSOLISATION (domaine tempéré).

Il s'agit d'un processus lié à deux conditions écologiques : (1) climat montagnard constamment humide, (2) matériaux volcaniques libérant de l'alumine dite "active". Décrit en détail par UGOLINI et ZASOSKI (1979), il a fait, en France, l'objet des recherches de HETIER (1975) et BOUDOT (1982).

Le type d'humus caractéristique est un mull andique, très épais, riche en composés humiques, très rapidement insolubilisés par l'alumine, peu polymérisés et à turnover très lent. Selon GUILLET *et al.* (1988), la matière organique a pratiquement l'âge du profil ; elle est donc exceptionnellement abondante.

Il convient de signaler deux possibilités de formation d'intergrades, soit par brunification partielle, lorsque le climat devient plus sec - les allophanes se transforment alors partiellement en halloysite (HETIER, 1975) - soit par podzolisation, lorsqu'une forte acidification provoque la formation d'un moder ; dans ce dernier cas, la formation d'acides fulviques abondants mobilise une grande partie des oxydes de fer et d'aluminium, et provoque leur migration (UGOLINI *et al.*, 1988).

D) MÉLANISATION

Ce vocable a été utilisé par SCHLICHTING (1986) et UGOLINI (1986) pour désigner le processus de noircissement du profil en milieu calcique, accompagnant la formation de la structure en gros grumeaux composés déjà décrite (structure "en éponge" selon SCHLICHTING). Nous l'utilisons ici faute de mieux. La mélanisation caractérise les rendzines.

La mélanisation s'accroît considérablement lorsqu'elle est favorisée par de très forts contrastes saisonniers du pédoclimat. La présence de calcaire actif n'est pas nécessaire, il suffit que le complexe absorbant soit saturé en calcium. La polycondensation des composés humiques atteint alors son maximum, de sorte que le sol devient franchement noir. Trois exemples de ce processus peuvent être tirés des trois thèses soutenues récemment à Nancy et Besançon : (1) dans la forêt de Chêne Zeen et de Chêne-liège de Kroumirie, sur grès numidien très acide, le calcium se concentre en surface par le jeu d'un cycle biogéochimique exceptionnellement efficace. Il se forme un horizon humifère, très épais et très foncé (SELMI, 1985). (2) Les sols humo-calciques sur karst jurassien, également très riches en matière organique de couleur noire, caractérisent les milieux très aérés, à calcaires fragmentés (GAIFFE, 1987). (3) Dans les planosols colombiens, cette matière organique polycondensée accompagne les argiles dans leur migration et constitue les revêtements noirs de l'horizon argilique (FAIVRE, 1988).

Inversement, il est fréquent que la mélanisation laisse la place à la brunification sur certains matériaux mixtes, par entraînement du calcium et accumulation relative des silicates, ce qui provoque une accélération du turnover de l'humus et la formation d'un mull mésotrophe, caractéristique des sols bruns : on se trouve alors en présence d'intergrades brunifiés.

En conclusion, il est possible d'affirmer qu'une bonne connaissance de la formation et de l'évolution des complexes organo-minéraux confirme parfaitement la trilogie de SCHROEDER : MILIEU << PROCESSUS << CARACTÈRES. Elle permet, en particulier, de comprendre et d'interpréter les relations existant entre les *processus* et les *caractères*. C'est la base indispensable de toute classification génétique des sols.

Reçu pour publication : Novembre 1989

Accepté pour publication : Septembre 1990

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREUX F., 1978 - *Etude des étapes initiales de la stabilisation physico-chimique d'acides humiques modèles*. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Nancy I, 161 p.
- BABEL U. & MEYER U., 1987 - Humusform im Schönbuch. *Mitteilungen D.B.G.*, 55-II, 471-476.
- BALESDENT J., 1982 - *Dynamique de l'humification des sols de prairies d'altitude du Haut-Jura*. Thèse Doct. Ing. Univ. Nancy I, 95 p.
- BARRIUSO E. B., 1985 - *Caractérisation des fractions organo-minérales et des constituants humiques d'un sol de pelouse subalpine*. Thèse Doct. d'Univ. Nancy I, 186 p.
- BARTOLI F., PHILIPPY R., BURTIN G., 1988 - Aggregation in soils with small amounts of swelling clays. I. and II. *J. Soil Sci.*, 39, 593-616, 617-628.

- BERTHELIN J., 1976 - *Etude expérimentale des mécanismes d'altération par les micro-organismes hétérotrophes*. Thèse Doct. ès Sci, Univ. Nancy I, 198 p.
- BONNE M., 1981 - *Variations saisonnières des éléments en solution dans les eaux de gravité et les eaux capillaires de trois sols acides de Lorraine*. Thèse Doct. Spéc., Univ. Nancy I, 74 p.
- BONNEAU M., 1985 - Influence des résineux sur le sol. Généralités sur les recherches effectuées dans le cadre du programme "Milieu rural" du PIREN. *Science du sol*, 4, 179-181.
- BOUDOT J.P., 1982 - *Relations entre l'altération minérale et le cycle de l'azote sur matériel chloriteux du massif schisto-grauwackeux vosgien*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 194 p.
- BOURRIÉ G. et GRIMALDI C. (1979) - Premiers résultats concernant la composition chimique des solutions issues de sols bruns acides sur granite en climat tempéré océanique. Coll. int. CNRS Nancy, *Migrations organo-minérales dans les sols tempérés*, 41-48.
- BRUCKERT S. et KILBERTUS G., 1980 - Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant & Soil*, 57, 271-295.
- BRUCKERT S., TAVANT Y., TAVANT H., GAIFFE M. et DUQUET B., 1986 - Ann. Sc. Univ. Franche-Comté, Biol. Vég. 4ème série, 25-29.
- COLEMAN D.C. & ELLIOTT E.T., 1986 - Spatio-temporal heterogeneity of organic matter in agro-ecosystems. *Proc. XIIIe Congrès A.I.S.S. Hambourg*, Vol. V, 140-148.
- CONINCK De F., RIGHI D., MAUCORPS J. et ROBIN A.M., 1974 - *Proc. 4 th Int. Working Meet. on Soil Micromorphology*, Kingston, Ontario, 263-280.
- DELECOUR F. et PRINCE-AGBODJAN W., 1975 - Etude de la matière organique dans une biotoposéquence de sols forestiers ardennais. *Bull. Rech. Agro. Gembloux*, 10, 275-290.
- FAIVRE P., 1988 - *Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie*. Thèse Doct. ès Sci, Univ. Nancy I, 561 p. + annexes.
- GAIFFE M., 1987 - *Processus pédogénétiques dans le karst jurassien. Analyse de la complexation organo-minérale en ambiance calcique*. Thèse Doct. ès Sci. Univ. Franche-Comté, Ann. Sci. Géologie, Mém. n° 5, 160 p.
- GRAS F., ROUILLER J., MERLET D. et BEQUER T., 1988 - Etude de l'aluminium dans les solutions de deux sols forestiers du massif vosgien. *C.R. Réunion DEFORPA*, Ministère de l'Environnement, 603-623.
- GUCKERT A., 1973 - *Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et leur rôle dans les mécanismes d'agrégation*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 124 p.
- GUILLET B., 1972 - *Relations entre l'histoire de la végétation et la podzolisation dans les Vosges*. Thèse Doct. ès Sci. Univ. Nancy I, 112 p.
- GUILLET B., FAIVRE P., MARIOTTI A. & KHOBZI J., 1988 - The ¹⁴C dates and ¹³C/¹²C ratios of soil organic matter, as a means of studying the past vegetation in intertropical regions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 65, 51-58.
- GUPTA V.V. & GERMIDA J.J., 1988 - *Soil Biol. Biochem.*, 20, 777-786.
- HAIDER K., 1986 - The synthesis and degradation of humic substances in soil. *Proc. XIIIe Cong. A.I.S.S. Hambourg*, Vol. VI, 644-656.
- HERBAUTS J., 1981 - *Evolution des sols sur les sables d'altération des calcaires gréseux infra-liasiques du Sud-Est de la Belgique*. Thèse Doct. Fac. Sci., Univ. Libre de Bruxelles, 206 p.
- HETIER J.M., 1975 - *Formation et évolution des andosols en climat tempéré*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 194 p.

- INSKEEP W.P. & BLOOM P.R., 1986 - Kinetics of calcite precipitation in the presence of water-soluble organic ligands. *Soil Sc. Soc. Amer. J.*, **50**, 1167-1172.
- JACQUIN F., HAIDOUTI C. et MULLER J.C., 1980 - Dynamique de la matière organique en sols carbonatés cultivés. *Science du sol*, **1**, 27-36.
- JEANROY E., 1983 - *Diagnostic des formes du fer dans les pédogénèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mössbauer*. Thèse Doct. d'Univ., Univ. Nancy I, 175 p.
- JOCTEUR-MONROZIER L., 1984 - *Nature et évolution de l'azote organique dans les sols et les sédiments marins récents*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 205 p.
- KUNTZE H., ROESCHMANN G & SCHWERTFEGER G., 1988 - *Bodenkunde*. Verlag eugen Ulmer, Stuttgart, 568 p.
- McKEAGUE J.A., DE CONINCK F & FRANZMEIER D.P., 1983 - Spodosols. In *Pedogenesis and Soil Taxonomy*. Tome II, L.P. Wilding, Smeck N.E. et Hall G.H. (eds), 217-252.
- McKEAGUE J.A., CHESHIRE M.V., ANDREUX F. & BERTHELIN J., 1986 - Organomineral complexes in relation to Pedogenesis. In : *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. SSSA Spec. Pub. N° 17, 549-592.
- MANGENOT F. et TOUTAIN F., 1980 - Les litières. In : *Actualités d'écologie forestière*. P. Pesson (ed.), Bordas, 3-59.
- MULLER J.C. et VEDY J.C., 1978 - Morphoscopie et fractionnement des matières organiques de rendzines sur craie. *Science du sol*, **2**, 129-144.
- NGUYEN KHA, 1973 - *Recherches sur l'évolution des sols de texture argileuse en conditions tempérées et tropicales*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 157 p.
- NYS C., 1987 - *Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier*. Thèse Doct. ès Sci., CNRF/Univ. Nancy I, 200 p.
- NYS C. et RANGER J., 1985 - Influence de l'espèce sur le fonctionnement de l'écosystème forestier. Le cas de la substitution d'une essence résineuse à une essence feuillue. *Science du sol*, **4**, 179-181.
- OADES J.M., 1986 - Associations of colloidal material in soils. *Proc. XIIIe Cong. A.I.S.S. Hambourg*, Vol. VI, 660-673.
- ORLOV D.S., BARANOVSKAIA V.A., OKOLELOVA A.A., 1987 - Organic matter of steppe soils of the Volga region and its transformation as a result of irrigation. *Soviet Soil Science*, **19** (6), 49-63.
- RIGHI D. et CHAUVEL A., 1987 - *Podzols et Podzolisation*. AFES et INRA, Plaisir et Paris, 231 p.
- ROBERT M. & BERTHELIN J., 1986 - Role of biological and biochemical factors in soil mineral weathering. In : *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. SSSA Spec. Pub., n° 17, 453-495.
- ROBIN A.M., 1979 - *Genèse et évolution des sols podzolisés sur affleurements sableux du Bassin Parisien*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 184 p.
- SCHLICHTING E., 1986 - *Einführung in die Bodenkunde*. V. Paul Parey, Hambourg, 131 p.
- SELMI M., 1985 - *Différenciation des sols et fonctionnement des écosystèmes forestiers sur grès numidien de Kroumirie (Tunisie)*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 198 p.
- SKJEMSTAD J.O. & DALAL R.C., 1987 - Spectroscopic and chemical differences in organic matter of two vertisols subjected to long periods of cultivation. *Austr. J. Soil Res.*, **25**, 323-335.
- SOUCHIER B., 1975 - *Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges)*. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 134 p.

- SOUCHIER B., 1984 - Les podzols et la podzolisation en climat tempéré et montagnard. *Livre Jubilaire AFES*, 77-96.
- TIESSEN H. & STEWART J.W., 1986 - Organic matter and soil aggregates. A microscopic study. *Proc. XIIIe Cong. A.I.S.S. Hambourg*, Vol. II, 644-645.
- TOUTAIN F., 1974 - *Etude écologique de l'humification dans les hêtraies acidiphiles*. Thèse Doc. ès Sci., Univ. Nancy I, 180 p.
- TOUTAIN F., 1981 - Les humus forestiers. Structure et mode de fonctionnement. *Rev. Forest. Fr.*, XXXIII, 449-477.
- UGOLINI F.C., 1986 - Pedogenic zonation in the well-drained soils of the Arctic regions. *Quaternary Res.*, **26**, 100-120.
- UGOLINI F.C. & ZASOSKI R., 1979 - Soils derived from Tephra. *In : Volcanic activity and human ecology*. Academic Press, 83-123.
- UGOLINI F.C. & DAHLGREN R., 1987 - The mechanism of podzolization as revealed by soil solution studies - *In : Podzols et podzolization*. D. Righi et A. Chauvel (eds). AFES et INRA, Plaisir et Paris, 195-206.
- UGOLINI F.C., DAHLGREN R., SHOJI S. & ITO T., 1988 - *Soil Science*, **145**, 111-125, 135-149.
- VEDY J.C., 1973 - *Relations entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide*. Thèse Doct. ès Sc., Univ. Nancy I, 206 p.