

HUMIFICATION ET ÉCOLOGIE

Ph. DUCHAUFOUR *

RÉSUMÉ

L'auteur fait une mise au point concernant les progrès récents des connaissances sur l'humus ; il tente de montrer que le fractionnement classique en acides fulviques, acides humiques et humine est arbitraire : les fractions ainsi séparées n'offrent pas de propriétés biochimiques définies.

Les acides humiques et l'humine en particulier peuvent être eux-mêmes subdivisés en composés jeunes, peu polymérisés faciles à biodégrader ; et au contraire en composés vieillis, très polymérisés, résistant à la biodégradation. Les différences de propriétés des divers humus naturels s'expliquent par la dominance de composés jeunes dans les uns, ou de composés très évolués dans les autres.

ABSTRACT

The author delineates the recent advances in our knowledge of humus. He tentatively shows the arbitrary character of the classical fractionation into fulvic acids, humic acids and humine: the biochemical properties of the fractions thus obtained are not clearly defined.

Humic acids and specially humine can be divided into (1) young, weakly polymerized, readily biodegradable compounds (2) old, highly polymerized, recalcitrant compounds. The discrepancies between the properties of the various native humus may be due to the predominance of recently formed compounds in some of them or the predominance of older compounds in the others.

* Centre de Pédologie du CNRS - Nancy.

PLAN

INTRODUCTION

1. MÉTHODE GÉNÉRALE D'ÉTUDE
2. ORIGINE ET ÉVOLUTION DES DIFFÉRENTES FRACTIONS
 - 2.1. Acides fulviques
 - 2.2. Acides humiques
 - 2.3. Humine
3. RÉSISTANCE DES COMPOSÉS HUMIQUES À LA BIODÉGRADATION
 - 3.1. Fraction labile
 - 3.2. Fraction de stabilité moyenne
 - 3.3. Fraction très stable
4. ACTION DES FACTEURS ÉCOLOGIQUES
 - 4.1. Activité biologique globale
 - 4.2. Climat
 - 4.3. Action des stabilisateurs minéraux

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Depuis cinq ans le Centre de Pédologie biologique du CNRS de Nancy a entrepris l'étude de l'évolution de la matière organique des sols en liaison avec les facteurs écologiques, par des méthodes très variées, qui ont donné lieu à de nombreuses publications.

Rappelons d'abord brièvement les méthodes de recherches qui ont été appliquées :

1) comparaison de diverses méthodes de fractionnement mettant en jeu, tantôt la séparation densimétrique et l'électrophorèse (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1966), tantôt l'utilisation des résines anioniques et cationiques (JACQUIN et *al.*, 1970) ;

2) étude de l'évolution biochimique des composés solubles émanant des litières, et de leur influence sur la complexation, la dispersion ou l'agrégation des composés minéraux (BRUCKERT, 1970 ; SOUCHIER et DUCHAUFOUR, 1969 ; NUSSBAUMER et *al.*, 1969 et 1970) ;

3) expérimentation sur colonne contenant deux types de « matériaux » purement minéraux (grès et arène granitique) et soumise à l'action de deux sortes de litières forestières, l'une améliorante, l'autre acidifiante, sous climat lorrain et vosgien (DUCHAUFOR et *al.*, 1968 ; NGUYEN KHA et *al.*, 1969) ;

4) expérimentation au laboratoire à l'aide de composés radioactifs incorporés à divers horizons caractéristiques et mis à incuber afin de suivre leur évolution et de contrôler leur action sur le taux d'agrégation (ROGER et *al.*, 1969 ; GUCKERT et *al.*, 1970 ; BRUCKERT, 1970).

Toutes ces recherches et expériences ont donné des résultats partiels, qui se complètent et se corroborent mutuellement, et dont la confrontation permet d'envisager le problème de l'évolution de la matière organique sous un jour nouveau : c'est une telle synthèse que nous nous proposons d'effectuer dans cet article ; elle montrera que la conception classique opposant la « matière organique fraîche » rapidement biodégradable aux « composés humiques » de néoformation, considérés comme plus résistants à la décomposition microbienne est pour le moins trop schématique et qu'elle doit être nuancée ; de même, l'importance donnée aux deux « composés » humiques fondamentaux, acides fulviques et humiques, apparaît exagérée, et la distinction que l'on fait souvent entre eux quelque peu arbitraire : manifestement, ces deux composés n'ont pas de véritable unité chimique, et il en existe plusieurs variétés de propriétés différentes. Enfin, nos recherches ont montré l'importance considérable — et aussi l'extrême hétérogénéité — d'une fraction de la matière organique, non extractible à l'aide des réactifs habituellement utilisés et pourtant plus ou moins fortement transformée par voie biologique ou physico-chimique : il s'agit de l'humine, encore mal connue, mais dont l'importance dans le sol apparaît chaque jour plus grande.

1. MÉTHODE GÉNÉRALE D'ÉTUDE

A la lumière des diverses expériences qui ont été effectuées, une notion fondamentale s'est rapidement fait jour : toute méthode d'étude *globale* de la transformation de la matière organique fraîche dans le sol, que ce soit sur le terrain même ou au laboratoire, ne peut donner que des renseignements incomplets ; en fait, il convient de distinguer dès le départ, le devenir des deux sources principales de l'humus : *la fraction insoluble* des débris végétaux (surtout membranes des cellules), susceptible soit d'évoluer directement en composés humiques insolubles, soit au contraire de passer par une phase soluble avant de se transformer par polymérisation ; *la fraction soluble* libérée directement par les litières ou provenant de pluviolessivage, et qui, lorsqu'elle s'infiltré dans le sol, s'insolubilise, puis se polymérise au contact des éléments minéraux, cela à un rythme très variable suivant les sols et les conditions écologiques. Dans les humus naturels, il n'est pas possible de séparer ces deux transformations parallèles : les travaux de BRUCKERT (1970) ont montré avec quelle rapidité les anions organiques simples s'intégraient aux molécules organiques plus grosses antérieurement formées ; en outre, le brassage opéré par les lombrics accélère le mélange des composés humiques, de diverses origines, et rend toute distinction impossible.

Dans certains sols cependant (podzols), la séparation se fait d'elle-même, car l'activité biologique très faible ne permet aucun mélange : les composés insolubles évoluent lentement à la surface du sol en formant un horizon A_0 épais, alors que les composés solubles s'infiltrèrent profondément en raison de la lenteur des processus biologiques agissant sur leur biodégradation ou leur polymérisation.

Mais les meilleures méthodes consistent à suivre, grâce à l'expérimentation, l'évolution *séparée* des deux sources de l'humus : l'expérience de décomposition des litières sur cylindres contenant un matériau minéral filtrant, permet de réaliser *in situ*, au moins dans les premières phases, les conditions d'une telle

séparation : la fraction insoluble reste en surface, la fraction soluble est rapidement entraînée par les pluies et s'incorpore au milieu minéral.

Au laboratoire, les procédés de fractionnement par densimétrie et centrifugation permettent d'obtenir un résultat semblable, quoique de façon plus grossière : après incubation à l'étuve par exemple, la séparation entre « surnageant » (matière organique fraîche insoluble, partiellement transformée en composés humiques) et « culot » (matière organique liée provenant surtout de l'évolution des éléments plus solubles), permet de reproduire et de vérifier dans une certaine mesure, l'expérience de terrain, mais en faisant varier sur une plus large échelle, les conditions bioclimatiques.

A la lumière des résultats ainsi obtenus, il est possible de reprendre en détail la définition et l'étude des trois fractions principales habituellement distinguées, acides fulviques, acides humiques et humine, et de préciser les modalités de leurs transformations par voie biologique ou physico-chimique, en fonction des facteurs écologiques.

2. ORIGINE ET ÉVOLUTION DES DIFFÉRENTES FRACTIONS

2.1. Acides fulviques

Les acides fulviques semblent résulter de l'insolubilisation plus ou moins rapide, au contact de la phase minérale, des « précurseurs solubles » originaires des litières : il s'agit soit d'acides phénols et d'acides aliphatiques, soit de « polymères » phénoliques plus ou moins colorés, soit encore de chaînes de saccharides, d'uronides, de polypeptides. Ces éléments s'organisent et se polymérisent plus ou moins rapidement dans le sol, suivant les conditions écologiques locales, et l'activité biologique globale : les acides phénols et les polymères paraissent constituer le « noyau » plus ou moins sphérique de la molécule fulvique, les autres éléments formant les chaînes latérales ; en l'absence d'argile, en milieu très acide et réducteur, ces précurseurs restent longtemps solubles, ils complexent le fer (à l'état ferreux) et l'ion Al^{+++} et favorisent leur entraînement : c'est le phénomène de podzolisation bien étudié par BRUCKERT (1970). En milieu acide, mais aéré, ces éléments sont absorbés par les molécules d'argile à l'état isolé, par l'intermédiaire des ions Ca^{++} ou Fe^{+++} (le second l'emportant dans les milieux plus acides) : il se forme ainsi un complexe *argile-acide fulvique* « dispersé », qui favorise le lessivage de l'argile en milieu acide (sol lessivé, SOUCHIER *et al.*, 1969). Dans les milieux biologiquement actifs, aérés et suffisamment pourvus en calcium échangeable, au contraire, les molécules d'acides fulviques tantôt se minéralisent entièrement, tantôt se polymérisent très rapidement par le processus de décarboxylation biologique : elles s'intègrent alors aux polymères phénoliques et participent à la cimentation des agrégats stables des « complexes argilo-humiques » totalement insolubles et résistant parfaitement aux processus d'entraînement (BRUCKERT, 1970).

2.2. Acides humiques

Il n'y a pas de différences fondamentales entre les acides humiques les plus jeunes et les acides fulviques, si ce n'est que les premiers sont plus polymérisés, que la « charge minérale » est plus forte, et qu'enfin, les chaînes sacchariques ou peptidiques latérales sont moins importantes par rapport au noyau phénolique : dans ces conditions, la distinction acide fulvique - acide humique, au moins dans la première

phase d'évolution de ces derniers, apparaît comme assez artificielle. Par contre, c'est au sein de l'ensemble des acides humiques qu'intervient une distinction fondamentale ; les résultats de nos recherches ont montré l'existence de deux groupes d'acides humiques à propriétés entièrement différentes :

— les acides humiques « jeunes », encore peu polymérisés, donc encore proches des acides fulviques qui sont peu résistants à la biodégradation microbienne (acides humiques « bruns »). Ces acides humiques jeunes peuvent provenir de deux sources : dans les milieux biologiquement actifs, ils résultent de la polymérisation rapide de composés hydrosolubles par oxydation enzymatique (ANDREUX, 1970). Dans les milieux acides et peu actifs (moder), ils proviennent d'une fragmentation progressive des molécules de lignine ;

— les acides humiques « évolués », à grosse molécule, à noyau phénolique très important par rapport aux chaînes latérales (acides humiques « gris »). Leur liaison avec les argiles est très intime et ils sont résistants à la biodégradation d'origine microbienne : ceci explique « l'âge moyen » (mesuré au ^{14}C) très élevé de l'humus des sols qui en sont riches, tels que les chernozems (PAUL et *al.*, 1964) alors que les acides humiques « jeunes » offrent un « turnover » du carbone relativement rapide (CAMPBELL et *al.*, 1967).

2.3. Humine

Cette forme d'humus non extractible n'est que très difficilement séparable de la matière organique fraîche ; le bromure d'acétyle a été parfois employé (JAMBU, 1968), mais il ne permet qu'une séparation incomplète. Il s'agit d'une forme d'humus très complexe et qui ne constitue pas une « entité » homogène, mais qui comporte un mélange hétérogène de plusieurs formes très différentes, dont trois ont été mises en évidence par voie expérimentale.

2.3.1. Forme résultant de l'évolution directe de certains composés végétaux (lignine), sans passage par une phase soluble : des radicaux carboxyles apparaissent par oxydation et ils permettent les liaisons chimiques avec les composés minéraux. Cette forme avait été mise en évidence par l'étude de l'évolution des sciures en milieu aéré et neutre, dès 1964 (BONNEAU et *al.*, 1964). Elle a été obtenue à nouveau, au cours de l'expérience *in situ* déjà citée, et apparaît au sein des litières améliorantes génératrices du mull. *Elle se forme surtout en milieu biologiquement très actif et aéré, au sein des mull : il a été possible de la mettre en évidence par l'augmentation continue de la capacité d'échange qui en deux ans a triplé dans les litières du mull, alors qu'elle a été seulement multipliée par 1,5 dans la litière du mor : les procédés de fractionnement densimétrique pratiqués sur les humus naturels confirment cette observation : alors que les mull sont riches en humine non extractible, les moder ou les mor, peu actifs, en contiennent très peu. Il semble que, dans ces milieux, la lignine subisse une dégradation de la molécule avec formation de « monomères » qui ensuite se polymérisent en « acides fulviques et humiques » extractibles, et non plus en humine.*

2.3.2. Humine résultant de l'insolubilisation très rapide de certains composés solubles. Cette forme a été mise en évidence de deux façons :

1) par l'expérimentation *in situ* sur colonnes ; elle résulte de l'insolubilisation dans les milieux minéraux, de certains composés originaires de la litière ;

2) GUCKERT et *al.*, 1970, par leurs expériences d'incubation dans les sols de composés glucidiques marqués au ^{14}C , ont pu préciser la nature de ces composés : il s'agit certainement de chaînes sacchariques ou uroniques, résultant de la condensation microbienne des glucides solubles, et qui sont pour la plupart responsables de la formation précoce d'« agrégats » structuraux dans les sols, comme l'a montré aussi MONNIER (1965). Ces composés ne sont pas solubles dans les réactifs alcalins, donc ne sont pas « extractibles » ; seuls ceux qui s'agrègent à certains noyaux phénoliques pourraient être extraits en même temps

que les acides fulviques. Grâce à leurs groupements carboxyles, ces chaînes glucidiques contractent des liaisons très précoces avec l'argile, surtout par l'intermédiaire du calcium, dont ils provoqueraient une sorte de « rétrogradation » organique en diminuant son caractère « échangeable » (VEDY, 1970).

Cependant, dans les sols acides, pauvres en calcium, mais bien pourvus en fer ferrique, c'est l'ion Fe^{+++} qui sert de cation de liaison comme l'a montré BRUCKERT, dans l'horizon B_h des podzols : une solubilisation du fer par HCl libère une partie de l'« humine » à l'état soluble.

2.3.3. Humine résultant d'une « surévolution » des acides humiques, par suite de leur maturation lente en climat très contrasté. Il s'agit d'acides humiques très polymérisés et liés intimement à l'argile, de sorte que toute séparation par des moyens chimiques devient pratiquement impossible, sauf par l'attaque fluorhydrique. Dès 1950, TIURIN *et al.* ont signalé ces formes d'acides humiques non extractibles dans les sols. Les recherches effectuées au Centre de Pédologie concernant l'extraction et le fractionnement des composés humiques à l'aide de résines échangeuses d'ions, ont confirmé l'existence de formes de passage entre les acides humiques les plus polymérisés et l'humine (JACQUIN *et al.*, 1970). Les résines ne solubilisent pas, en fait, les acides humiques très polymérisés, mais provoquent la « dispersion » d'une partie du complexe argilo-humique indissociable : ce qu'on dose sous forme de carbone des acides humiques n'est en fait que le carbone lié aux argiles « dispersables », alors que le carbone lié aux argiles non dispersables est considéré comme « humine ». On saisit ici le caractère très artificiel de cette distinction et de cette séparation. Cette humine est abondante dans les sols à forts contrastes microclimatiques (chernozems, vertisols) : la liaison très intime avec certaines argiles, généralement gonflantes, est assurée par des cations tels que Ca^{++} et Fe^{+++} .

3. RÉSISTANCE DES COMPOSÉS HUMIQUES A LA BIODÉGRADATION

D'après ce qui précède, on saisit aussitôt le caractère arbitraire de la distinction entre matière organique fraîche « labile » et « humus » résistant à la décomposition microbienne : on peut affirmer que certaines fractions humiques — les composés jeunes d'origine essentiellement biologique — sont au moins aussi labiles que la matière organique fraîche ; parfois davantage, lorsque l'évolution des litières est freinée par des conditions défavorables du milieu (acidité, moder par exemple).

D'autres composés, ceux qui ont subi une « maturation » lente sous l'action de contrastes microclimatiques accentués, sont au contraire exceptionnellement résistants à la biodégradation.

Nous verrons dans le paragraphe suivant, que certains facteurs écologiques (notamment les contrastes saisonniers) peuvent exercer une *action inversée* sur les deux types de composés humiques, accélérant la biodégradation des premiers, ou au contraire ralentissant celle des seconds : on voit à quel point cette distinction est capitale.

Nous classerons, un peu schématiquement, les composés humiques en trois fractions : 1) labile ; 2) de stabilité moyenne ; 3) très stables.

3.1. Fraction labile

Il s'agit évidemment des formes « jeunes », celles qui résultent d'une polymérisation faible et incomplète de molécules solubles et qui ont contracté très rapidement des liens chimiques avec les argiles :

certaines acides fulviques, acides humiques jeunes, formes de l'humine, résultant de l'évolution de produits solubles, constituées surtout de chaînes de saccharides ou d'uronides ; la décomposition de ces fractions est accélérée, nous le verrons, par les alternances saisonnières très contrastées ; c'est seulement dans les sols podzoliques à mor que certains de ces composés, qualifiés souvent d'acides fulviques « agressifs » par les auteurs russes, probablement composés phénoliques comme l'a montré BRUCKERT, exercent une action toxique à l'égard des bactéries, et « tannante » à l'égard de certaines protéines (HANDLEY, 1954) : ils sont alors *durables* et contribuent à la podzolisation (BRUCKERT et DOMMERGUES, 1966 et 1968).

3.2. Fraction de « stabilité moyenne »

Il s'agit de la fraction de l'humine, provenant d'une oxydation rapide de la lignine, dans les litières dites « améliorantes », c'est-à-dire les plus riches en azote : cette forme d'humine nous l'avons dit, est mesurée de façon indirecte par augmentation régulière de la capacité d'échange des litières : or, dans l'expérience de décomposition sur le terrain, la capacité d'échange croît de façon absolument continue et régulière depuis deux ans (sauf une baisse brutale — très explicable — lors des recharges annuelles en litière fraîche) ; les alternances saisonnières n'ont presque aucune influence sur cette augmentation de la capacité d'échange, dont la courbe a seulement une pente plus faible en hiver (NGUYEN KHA et *al.*, 1969).

Ceci montre la relative stabilité de cette forme d'humine qui, bien que jeune, est relativement insensible à l'action des saisons ; les valeurs considérables de l'humine, mesurée dans les mull les plus actifs (50 à 60 % du carbone total) attestent la relative stabilité de cette fraction à l'égard de la biodégradation.

3.3. Fraction très stable

Il s'agit des fractions les plus évoluées : acides humiques gris très polymérisés, abondants dans les sols à climats dont les saisons sont très contrastées ; humine résultant de la « surévolution » de ces acides humiques ; les expériences de NGUYEN KHA et VEDY (1969) ont montré l'opposition entre les deux formes d'acides humiques : ceux des mull tempérés sont instables et très sensibles aux alternances saisonnières de type « tempéré atlantique », c'est-à-dire sans contrastes de température et d'humidité trop marqués. Leur biosynthèse est plus active pendant les périodes hivernales et printanières, par contre, ils sont biodégradés à nouveau en été ; ceux des mull tropicaux (vertisols) sont parfaitement stables, et absolument insensibles aux contrastes saisonniers réalisés artificiellement à l'étuve, même s'ils sont très accentués et analogues à ceux d'un climat tropical. Bien mieux il a été possible de transformer par polymérisation provoquée, les acides humiques du mull tempéré en acides humiques stables de type tropical, en les soumettant à ces alternances saisonnières de type tropical : nous reviendrons sur cette expérience dans le paragraphe suivant.

4. ACTION DES FACTEURS ÉCOLOGIQUES

Les facteurs écologiques jouent évidemment un rôle essentiel dans l'évolution des différentes fractions de l'humus ainsi définies. En dehors de l'« activité biologique globale » des horizons humifères, qui, en climat tempéré surtout, exerce une action particulièrement importante, nous opposerons l'action du climat, à celle du milieu minéral auquel l'humus est incorporé.

4.1. Activité biologique globale

Elle est elle-même la résultante de l'action de plusieurs facteurs dont les trois principaux sont, rappelons-le : la composition des litières (améliorante ou acidifiante), le pH du milieu, et enfin l'aération, dont l'importance considérable paraît avoir été sous-estimée, et qui est actuellement l'objet de recherches au CNRS.

On oppose couramment les types d'humus forestiers biologiquement actifs (mull) à ceux qui manifestent une faible activité biologique (moder ou mor). Rappelons que les processus d'humification sont bien différents dans les deux types de milieux : une première différence, déjà soulignée, réside dans la teneur en « humine » résultant de l'oxydation directe de la lignine, beaucoup plus élevée dans le mull que dans les moder ou les mor. La lignine qui subsiste longtemps, presque sans modification biochimique dans les mor, ne doit pas, à notre sens, être considérée comme une substance humique.

Une seconde différence tient à la rapidité beaucoup plus grande des processus d'humification (et aussi, corrélativement, deshumification) dans le mull que dans les moder ou dans les mor : dans les horizons A_1 du mull, l'intégration des anions, ou des polymères solubles dans les molécules d'acides humiques préexistants, intervient de façon accélérée par « décarboxylation » biologique (BRUCKERT, 1970). Les noyaux cycliques en particulier, débarrassés de leurs carboxyles, sont absorbés au sein des molécules humiques. *Dès la base de l'horizon A_1 des sols à mull, il ne reste plus trace de composés organiques solubles susceptibles de migrer en profondeur* ; il n'en est évidemment pas de même dans les sols podzoliques à moder ou à mor, dans lesquels les composés solubles des litières (acides organiques et polymères) migrent en complexant le fer et l'aluminium, jusqu'au niveau de l'horizon B où l'ensemble s'insolubilise.

4.2. Climat

Les expériences de NGUYEN KHA et VEDY (1969) ont montré l'importance considérable des *contrastes saisonniers* dans l'évolution de l'humus, surtout lorsque des périodes de sécheresse caractérisent les phases estivales.

En climat « atlantique », à saisons faiblement contrastées, tant pour la température que pour l'humidité, seules les formes les plus labiles d'acides humiques prennent naissance ; les acides humiques bruns se forment en saison humide et froide, et sont partiellement biodégradés en été ; l'humification reste faible, l'horizon humifère est peu épais et peu coloré (humus de type « cryptomull »). Lorsqu'au contraire les contrastes saisonniers sont plus marqués et que le climat comporte des phases de sécheresse accentuées (type tropical ou continental), l'humification augmente d'intensité, et elle aboutit à des formes plus polymérisées et plus stables. Les humus des climats continentaux sont plus épais et plus foncés que les mull atlantiques.

Il convient de souligner que les contrastes climatiques répétés agissent en sens inverse sur les composés les plus labiles, encore proches de la matière organique fraîche, et sur ceux qui ont déjà subi un début de « stabilisation » : *ils accélèrent la décomposition des premiers, alors qu'au contraire ils freinent celle des seconds* ; dans les chernozems par exemple, une partie des composés humiques labiles (acides humiques bruns, et formes d'humine les plus jeunes) subit un « turnover » très rapide, alors que d'autres formes déjà plus évoluées sont au contraire soustraites à ce « turnover » et se stabilisent rapidement (CAMPBELL et al., 1967). Dans les vertisols, cette opposition est poussée à l'extrême comme l'ont montré les expériences de NGUYEN KHA et al. (1969 et 1970) : la partie labile arrive à disparaître presque entièrement, seule subsiste une petite fraction d'acides humiques et d'humine très polymérisée et très stable.

4.3. Action des « stabilisateurs » minéraux

Nous avons souligné la rapidité avec laquelle les composés issus des litières contractaient des liens plus ou moins étroits avec les argiles, parfois les hydroxydes de fer et d'aluminium, et enfin, dans certains sols, le carbonate de calcium actif : pour beaucoup d'auteurs, ces liens se traduisent par un effet de « protection » à l'égard de la biodégradation microbienne, donc une augmentation de la stabilité ; cette notion est une fois encore, trop schématique, et certaines distinctions doivent être faites à ce point de vue :

— *Les hydroxydes amorphes*, plus ou moins liés à la silice, exercent l'effet protecteur maximum à l'égard des acides humiques qu'ils absorbent : rappelons à ce sujet que les composés « allophane-humus » relativement stables, caractérisent les andosols, sols en général très humifères.

— *Les argiles*, par contre, n'exercent pas à l'égard de l'humine et des acides humiques labiles, l'action protectrice qu'on lui a longtemps attribuée ; elles n'empêchent nullement leur biodégradation estivale, comme l'ont montré NGUYEN KHA et VEDY (1969). A l'opposé, les argiles gonflantes, et les interstratifiés de type 2/1, contribuent de façon très efficace à stabiliser les formes les plus évoluées et les plus polymérisées, lorsqu'elles sont soumises artificiellement à des phases de dessiccation ; la polymérisation des acides humiques gris est plus rapide lorsqu'elle a lieu en présence de l'argile (culot du fractionnement densimétrique), qu'au sein de la fraction organique dépourvue d'argile (surnageant).

— *Le carbonate de chaux* des rendzines exerce une action importante mais très complexe : non seulement il stimule l'activité biologique globale, mais il exerce en outre de façon plus directe, une triple action : 1) il accélère les processus d'insolubilisation chimique des composés solubles originaires de la litière : acide fulvique et humine jeune ; 2) il favorise les processus d'oxydation enzymatique, donc la transformation de la lignine en « humine » insoluble, et les premières phases de la polymérisation des acides fulviques et humiques ; 3) il protège d'une manière efficace les composés humiques jeunes ainsi formés en ralentissant dans une certaine mesure leur biodégradation (JACQUIN, 1963). Ceci a été récemment vérifié par JUSTE (1970).

Au total, les mull calciques des rendzines sont très riches en composés humiques « jeunes » (spécialement en humine sous ses deux aspects proches de la matière organique fraîche) : leur formation se trouve être en effet accélérée et leur biodégradation au contraire, ralentie.

On saisit ici la différence considérable qui existe entre l'humus jeune — stabilisé par le calcaire — d'une rendzine tempérée et l'humus vieux très évolué et très stable d'un chernozem, dans la formation duquel les ions Ca^{++} et Mg^{++} ont joué certes également un rôle, mais en liaison étroite avec celui exercé par le climat contrasté et la présence d'argiles gonflantes.

CONCLUSION

En conclusion, il est possible d'affirmer que, si le fractionnement des composés humiques, en acides fulviques, acides humiques et humine, est un procédé commode et rapide pour la pratique courante des laboratoires, il ne correspond pas en fait, à des coupures valables entre composés humiques de propriétés nettement définies.

Les recherches que nous avons effectuées ont au contraire, montré qu'il était nécessaire de diviser les composés humiques en deux grands groupes, fondamentalement différents.

1) *Les composés humiques jeunes, encore faiblement polymérisés* : ils comprennent la presque totalité des acides fulviques, une partie des acides humiques et de l'humine ; ils sont largement dominants dans les climats tempérés atlantiques, à faibles contrastes saisonniers. Généralement labiles, sauf certaines formes, engendrées par la décomposition des litières « acidifiantes », ils sont sensibles, comme la matière organique fraîche, aux contrastes saisonniers *modérés* (sans fortes dessiccations estivales), et subissent des phases alternantes de néoformation (hiver et printemps) et de biodégradation (été) ; ils ne s'accumulent donc pas dans le profil. Les liaisons qu'ils contractent avec l'argile sont suffisamment lâches pour qu'elle n'exerce aucun « effet protecteur » efficace vis-à-vis de la décomposition microbienne. Par contre, la présence de calcaire actif dans le sol accélère leur formation et favorise leur conservation, de sorte qu'ils sont particulièrement abondants dans les sols calcaires.

2. *Les composés humiques stables à grosse molécule* sont constitués d'acides humiques gris et d'humine très évolués et liés de façon intime aux argiles (par l'intermédiaire des cations polyvalents) ; non seulement ils résistent aux contrastes microclimatiques très accentués qui caractérisent certains climats continentaux et tropicaux, mais encore leur formation est favorisée par ces contrastes saisonniers, de sorte qu'ils dominent dans ces climats ; ils sont les constituants prépondérants des mull de steppe, des humus des vertisols, etc. Les cations alcalino-terreux, et la présence d'argiles gonflantes sont des facteurs favorables à leur formation et à leur conservation.

Sur le plan pratique, les conclusions qu'il est possible de tirer de l'ensemble de ces recherches sont de deux ordres, l'une intéressant la nutrition azotée des plantes, l'autre la structure et l'agrégation des sols.

En ce qui concerne la nutrition azotée, il convient de souligner que le rôle des composés humiques est à ce point de vue très variable suivant leur résistance à la biodégradation : alors que les composés les plus stables (acides humiques gris) ne jouent dans ce domaine qu'un rôle négligeable, il n'en est pas de même des acides humiques labiles, qui se comportent en « intermédiaires » efficaces : l'azote minéralisé lors de la décomposition des protéines végétales des litières, se réorganise au sein de ces composés humiques qui permettent son stockage temporaire ; les phases de minéralisation et de réorganisation de l'azote se succédant, nous l'avons vu, à un rythme rapide au gré des saisons, et même à l'occasion de simples variations météorologiques très temporaires, l'azote est progressivement restitué aux plantes sous forme minérale : l'humus jeune constitue ainsi un volant, une réserve d'azote, qui empêche les pertes pouvant intervenir soit par évaporation sous forme ammoniacale, soit par lessivage.

Les composés humiques que nous avons distingués, contribuent aussi, à des degrés divers, à assurer la formation d'agrégats, donc à former la structure caractéristique du sol : seuls les acides fulviques peu polymérisés et « durables » des sols podzoliques à moder ou à mor, favorisent la dégradation de la structure, donc le « lessivage » et la podzolisation. Dans les humus biologiquement actifs (mull), chacun des composés que nous avons distingués exerce une action différente (BRUCKERT *et al.*, 1970) : parmi les composés humiques jeunes, ce sont les saccharides inclus dans l'humine, qui sont les plus efficaces, mais leur action est éphémère (MONNIER, 1963) ; les acides humiques sont moins efficaces, et leur action est également de courte durée, puisqu'ils sont labiles. Ces composés humiques jeunes sont à l'origine de structures peu stables, qui se dégradent et se régénèrent périodiquement au gré des saisons. Seuls les acides humiques gris et l'humine très polymérisée des humus « murs » édifient des structures très stables, parfaitement résistantes à l'action des agents extérieurs.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREUX (F.), JACQUIN (F.), METCHE (M.), 1970 — Etude de la minéralisation et de l'humification biologique d'autolysats foliaires de *Juglans regia*. *C.R. Ac. Sci. Paris*, 270, 3017-3020.
- BONNEAU (M.), DUCHAUFOR (Ph.), MANGENOT (F.), 1964 — Etude de l'humification de composts de sciure. *Ann. Inst. Pasteur*, 107, suppl. 3, 109-122.
- BRUCKERT (S.), DOMMARGUES (Y.), 1966 — Etude expérimentale de la biodégradation de deux complexes organo-ferriques dans un sol à mor et dans un sol à mull. *Sci. du sol*, 2, 65-76.
- BRUCKERT (S.), DOMMARGUES (Y.), 1968 — Importance relative de l'immobilisation physico-chimique et de l'immobilisation biologique du fer dans les sols. *Sci. du sol*, 1, 19-27.
- BRUCKERT (S.), JACQUIN (F.), 1969 — Interaction entre la mobilité de plusieurs acides organiques et de divers cations dans un sol à mull et dans un sol à mor. *Soil Biol. & Biochem.*, 1, 275-294.
- BRUCKERT (S.), JACQUIN (F.), 1969 — Complexation du fer (III) par les fractions organiques d'un extrait naturel de mor. *C.R. Ac. Sci. Paris*, 269, (17), 1625-1628.
- BRUCKERT (S.), 1970 — Influence des composés organiques solubles sur la pédogenèse en milieu acide. Thèse Etat, Fac. Sci. Nancy, 70 p.
- CALVEZ (C.), 1970 — Contribution à l'étude des processus d'extraction et de caractérisation des composés humiques. Thèse 3^e cycle Fac. Sci. Nancy, 66 p.
- CAMPBELL (C.A.), PAUL (E.Q.), RENNIE (D.A.), McCALLUM (K.J.), 1967 — Factors affecting the accuracy of the carbon dating method in soil humus studies. *Soil Sci.*, 104, (2) 81-86.
- CAMPBELL (C.A.), PAUL (E.Q.), RENNIE (D.A.), McCALLUM (K.J.), 1967 — Applicability of the carbon dating method of analysis to soil humus studies. *Soil Sci.*, 104, (3) 217.
- DOMMARGUES (Y.), MANGENOT (F.), 1970 — Ecologie microbienne du sol. Masson & Cie, Paris, 796 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), JACQUIN (F.), 1966 — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E.N.S.A.N.*, 8, (1), 1-24.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1968 — L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils. Masson & Cie, Paris, 91 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), VEDY (J.C.), BRUCKERT (S.), 1968 — Contribution à l'étude expérimentale « In situ » de l'évolution chimique et de l'altération d'un grès et d'un granite vosgiens sous l'influence de deux types de litières. Evolution du carbone et de l'azote au cours du premier cycle de végétation. *Bull. A.F.E.S.*, 1, 5-18.
- GUCKERT (A.), NUSSBAUMER (E.), JACQUIN (F.), 1970 — Etude comparée de l'action du glucose ¹⁴C et de la paille ¹⁴C sur la stabilité structurale d'un sol limoneux acide. *Bull. E.N.S.A.N.*, 11, (1-2), 26-35.
- HANDLEY (W.R.C.), 1954 — Mull and mor formation in relation to forest soils. Thèse, Forestry Commission, 23, Londres, 116 p.
- JACQUIN (F.), 1963 — Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. Thèse Etat Fac. Sci. Nancy, 140 p.
- JACQUIN (F.), 1963 — Notions récentes concernant le bilan humique d'un sol cultivé. *Bull. A.F.E.S.*, 10 et 11, 442-468 et 492-511.
- JACQUIN (F.), CALVEZ (C.), METCHE (M.), 1970 — *Sci. du sol* (sous presse).
- JAMBU (P.), 1968 — Observation sur l'humification en milieu calcaïque hydromorphe. *Sci. du sol*, 1, 66-89.
- JUSTE (C.), 1970 — *Sci. du sol* (sous presse).
- MONNIER (G.), 1965 — Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Etat Fac. Sci. Paris, 140 p.
- NGUYEN KHA, DEVY (J.C.), DUCHAUFOR (Ph.), 1969 — Etude expérimentale de l'évolution saisonnière des composés humiques en climat tempéré. *Pédologie*, Gand, 19 (1), 5-22.
- NGUYEN KHA, DUCHAUFOR (Ph.), 1969 — Etude comparative de l'évolution de la matière organique du sol en conditions tempérées et tropicales. *Pédologie*, Gand, 19 (1), 49-64.

- NGUYEN KHA, DOMMARGUES (Y.), 1970 — Influence de l'hygrothermopériodisme sur la stabilité de la matière organique du sol mesurée par respirométrie. *Sci. du sol*, 1, 53-62.
- NUSSBAUMER (E.), GUCKERT (A.), JACQUIN (F.), 1970 — Nature et répartition de la matière organique cimentant les agrégats d'un sol après incubation en présence de glucose radioactif. *C.R. Ac. Sci. Paris*, 270, 3235-3238.
- PAUL (E.A.), CAMPBELL (C.A.), RENNIE (D.A.), McCALLUM (K.J.), 1964 — Investigations of the dynamics of soil humus utilizing carbon dating techniques. *Cong. Int. Sci. Sol*, 8, 1964, Bucarest, vol. III, commission II, pp. 201-208.
- ROGER (P.), 1969 — Application des méthodes radioisotopiques à l'étude comparée des acides citrique et oxalique dans un sol à mull et dans un sol à mor. Thèse 3^e cycle Fac. Sci. Nancy, 14 p.
- ROGER (P.), BRUCKERT (S.), JACQUIN (F.), 1969 — Etude de l'évolution de l'acide oxalique dans les sols et comparaison avec la dynamique de l'acide citrique. *Bull. E.N.S.A.N.*, 11 (1), 3-11.
- ROGER (P.), BRUCKERT (S.), JACQUIN (F.), 1969 — Etude de l'évolution de l'acide citrique dans un podzol humo-ferrugineux et dans un sol brun lessivé. *Sci. du sol*, 2, 99-113.
- SOUCHIER (B.), DUCHAUFOUR (Ph.), 1969 — Sur la stabilité des suspensions argileuses en milieu acide. *C.R. Ac. Sci.*, 268, 1849-1852.
- VEDY (J.C.), BRUCKERT (S.), 1970 — Evolution saisonnière de composés organiques solubles en relation avec divers processus biochimiques d'humification. *Pédologie*, Gand, sous presse.