

**LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS :
ASPECTS HISTORIQUES
ET ÉTAT DES CONCEPTIONS ACTUELLES**

*SOIL ORGANIC MATTER :
HISTORICAL ASPECTS AND PRESENT KNOWLEDGE*

par Christian Feller (*)

RÉSUMÉ

Différentes significations, ayant persisté jusqu'à nos jours, ont été attribuées au terme humus, soit la notion globale de sol, puis d'horizon de sol, soit la notion de "constituant" du sol ; cet article concerne l'humus en tant que constituant, c'est-à-dire la matière organique du sol (MOS) considérée dans un sens large. Nous analysons tout d'abord les origines historiques du concept d'humus-constituant et ses relations avec les doctrines agricoles à travers les diverses théories de nutrition des plantes qui se sont succédé jusqu'au milieu du dix-neuvième siècle. Ensuite, nous décrivons brièvement les interrogations portant sur la composition et l'origine de la MOS. Enfin, nous montrons comment la nécessité d'identifier des fractions organiques ou biologiques du sol susceptibles d'exercer une fonction spécifique vis-à-vis de diverses propriétés édaphiques, autrement dit la recherche de "compartiments organiques ou biologiques fonctionnels", a conduit, depuis 1960, à faire émerger, d'une part, la notion de "biomasse microbienne" et, d'autre part, des techniques de fractionnements physiques (granulométriques et densimétriques) de la MO en addition aux fractionnements chimiques antérieurement utilisés. Les recherches actuelles, soutenues par de nouveaux moyens physico-chimiques performants et l'usage des techniques isotopiques, et s'inscrivant souvent dans l'intérêt de notre époque pour les changements "globaux", vont dans le sens d'une intégration hiérarchisée des approches physiques, microbiennes et chimiques, en vue d'alimenter des modèles de dynamique de la MOS des sols.

Mots clés : humus, biomasse, flore microbienne, matière organique du sol, fertilité du sol.

SUMMARY

Different meanings are attached to the term humus which has persisted until the present time : either the original sense of "soil", before that of soil layer, or the sense of soil "constituent". This paper deals specifically with humus defined as a soil constituent, i. e. with the broad meaning of soil organic matter (SOM). The origin of the "humus-constituent" concept will be described with regard to the agricultural doctrines - especially the various theories about plant nutrition -, that prevailed till the middle of the nineteenth century. This will be followed by a rapid questioning on the composition and origin of SOM. Finally, we shall present how it became necessary to identify soil organic or biological fractions likely to play a role towards some soil properties ; the isolation of such "functional organic or biological compartments" of the soil led, since the sixties, to the development of the "microbial biomass" approach and that of the "physical fractionation" of organic matter (density as well as particle-size fractionation) in addition to previous chemical approaches. The methodological works in progress with the use of the powerful tool of physico-chemistry and isotopy will lead to an integration of the "microbial/chemical/particle-size" approaches through global conceptual models of SOM dynamics.

Key Words : humus, microbial flora, biomass, soil organic matter, soil fertility.

(*) Correspondant de l'Académie. Directeur de recherches à l'ORSTOM, Laboratoire d'étude du Comportement des Sols cultivés (LCSC), Montpellier.
C.R. Acad. Agric. Fr., 1997, 83, n° 6, pp. 85-98. Séance du 8 octobre 1997.

INTRODUCTION

“Humus : what is it ? The spirit of the soil. The product and the source of life. The go-between the fallen leaves and the salt of the earth ... One of the soil's components which like the philosopher's stone and the homunculus was a mysterious item of alchemists and which still remains one, electronic analyses notwithstanding”.

(Wilde, 1971).

C'est relativement récemment que la locution très générale matière organique (MO) des sols (MOS) a été préférée au terme humus pour nommer les constituants organiques, morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, fortement transformés ou non, trouvés dans les sols. En effet, au cours des siècles, et jusqu'à aujourd'hui, le terme humus fut largement usité, recouvrant des significations très différentes selon le contexte de l'étude. **Duchaufour** (1970) en donne la définition suivante :

“le mot humus désigne, dans son sens le plus étroit, la fraction de la matière organique du sol qui a subi une transformation plus ou moins rapide, d'origine biologique et aussi physico-chimique... Au sens le plus large du terme “... (l'humus)...” désigne l'ensemble des horizons organiques”.

Ainsi, le même terme est utilisé pour décrire au moins deux concepts très différents, celui de constituant - la matière organique des sols, au sens large – et celui d'horizon pédologique. L'historique de ces deux concepts, en particulier celui d'horizon, a été fait récemment (9). Dans cet article, nous insisterons plutôt sur l'évolution des idées concernant l'humus en tant que constituant, ses relations avec les doctrines agricoles passées et ses différents modes d'étude en fonction des techniques disponibles et de nouvelles interrogations sur l'identification de compartiments organiques et biologiques du sol susceptibles d'exercer des fonctions spécifiques dans les grands cycles biogéochimiques.

Nous aborderons ici les points suivants :

- l'humus et la recherche sur la nutrition végétale,
- l'humus et la recherche de sa formule,
- l'humus et la recherche de compartiments biologiques ou organiques “fonctionnels” des sols.

1. L'HUMUS ET LA RECHERCHE SUR LA NUTRITION VÉGÉTALE

1.1. Les définitions de l'humus

Depuis l'Antiquité, le terme humus a pris différentes significations (8), avec des imprécisions linguistiques particulièrement importantes au dix-huitième siècle. Ceci explique la rémanence de ses deux significations, toujours actuelles, de constituant ou d'horizon du sol.

Ainsi, on peut lire des définitions telles que :

- “la terre calcaire est donc la seule terre végétale, le véritable humus soluble dans l'eau et la seule qui établit et constitue la charpente des plantes... si on amoncelle les plantes... si on les laisse se décomposer... on obtiendra, en dernière analyse, la terre calcaire pure, le véritable

humus... Cultivateurs, ne songez qu'à créer ce précieux humus... qui est une vraie terre animalisée... la seule qui entre dans la composition des plantes.." (16, t. 9).

En 1823, **Chaptal** parle encore d'"humus minéral".

C'est **Thaer** (1811) qui, le premier, donnera une définition précise de l'humus :

"Le nom qu'on donne ordinairement à cette substance est terreau. Cette expression a été mal comprise par beaucoup de gens lorsque, par là, il ont entendu la couche de terre végétale et non cette partie particulière des substances qui la constituent. Cette méprise a été faite, même par quelques écrivains savants agronomes, et cela a augmenté d'autant l'obscurité qui planait déjà sur cette partie de la science. C'est pour cela que j'ai adopté la dénomination d'humus, sur laquelle il ne peut pas y avoir d'équivoque. En général, dans la science, la dénomination terre ne lui convient pas ; ce n'est, à proprement parlé, point une terre ; elle n'a été désignée sous ce nom qu'à cause de sa forme pulvérulente... L'humus est le résidu de la putréfaction végétale et animale, c'est un corps noir" (18, vol. 2, pp. 102-114),

Suit une description très détaillée et complète pour l'époque de sa composition, son extractabilité et ses propriétés.

1.2. Les concepts de fertilité et la recherche sur la nutrition végétale

Cette imprécision dans la définition de l'humus s'accompagne aussi, au dix-huitième siècle, de théories mal établies, ou en perpétuelle reconsidération, sur la nutrition des plantes, et fortement centrées sur le rôle majeur exercé par le sol en général et les MOS en particulier :

- du seizième au dix-huitième siècle, beaucoup de "théories" inspirées d'**Aristote** font référence aux "sels", aux "sucs", aux "huiles" aux "grasses", aux "substances bitumineuses" du sol, pour expliquer le "principe de végétation" (9) ;

- à la fin du dix-huitième siècle, divers écrits, qui serviront de bases théoriques à la "Théorie de l'humus" de **Thaer**, témoignent de l'importance accordée à l'humus dans la nutrition des plantes. Les principaux sont ceux d'**Hassenfratz** (1792) dont les conclusions sont :

"Concluons que de toutes les manières d'expliquer l'accroissement du carbone des plantes par l'acte de végétation, celle qui a un rapport le plus direct avec les engrais, celle qui s'accorde le mieux avec tous, est la dissolution du charbon dans l'eau, sucé ensuite par les racines et déposé dans l'intérieur des plantes ; qu'ainsi, le charbon dissous dans l'eau est une des substances nutritives des plantes" ;

- pourtant, dès la fin du dix-huitième siècle et le début du dix-neuvième siècle, des travaux précurseurs sur la photosynthèse sont déjà connus (**Priestley**, **Ingen-Housz**, **Sénébier** et **de Saussure**). C'est aussi **de Saussure** (1804) qui précise que si la plante peut se nourrir partiellement à partir du "terreau", 95 % de sa matière sèche proviennent de l'atmosphère ;

- mais c'est en 1840, à la suite des écrits de **Liebig**, que dans la quasi-totalité du monde scientifique, on reconnaîtra la "Théorie minérale de la

nutrition de la plante” et que les substances carbonées végétales ne sont pas formées à partir des MOS. Ceci posera les fondements théoriques de l'utilisation des engrais minéraux.

1.3. La “théorie de l'humus” et ses implications agronomiques. Un savant trop critiqué : **Thaer**.

L'agronome allemand Albrecht-Daniel **Thaer** s'appuiera sur les arguments d'**Hassenfratz** pour développer sa “théorie de l'humus” (1) qui fait de l'humus du sol la source principale de la matière sèche des plantes. C'est en 1809 que l'ouvrage de **Thaer** “Principes raisonnés d'agriculture” est publié en allemand, puis traduit en français en 1811 par E.V.B. **Crud**. Cette huitième œuvre, remarquable dans bien des domaines, fut une référence pour de nombreux agronomes et fermiers jusqu'en 1840. Ses qualités : un grand nombre de données expérimentales, un vocabulaire précis, l'effort de quantifier, dans le but d'aboutir à une “agriculture rationnelle”. Son principal défaut (et qui lui valut des critiques violentes de **Liebig**, **Grandeau**, etc.), est de s'appuyer sur l'hypothèse fautive, développée par **Hassenfratz** (1792), que la plus grande partie de la matière sèche de la plante trouve son origine dans l'humus du sol. De ce fait, *gérer la fertilité signifie gérer l'humus*.

Aussi, après avoir dressé une typologie en neuf systèmes des exploitations agricoles de son pays, **Thaer** développe, pour leur gestion, de véritables modèles agro-économiques basés sur des bilans organiques. Il établit les relations entre apports organiques et productions végétales et animales et quantifie les entrées et les sorties de MO au niveau de la parcelle et de l'exploitation. Il en déduit les quantités de fumier nécessaires pour atteindre une productivité donnée en céréales, et la surface indispensable en prairies pour maintenir un cheptel suffisant aux besoins de fertilisation. Il teste ensuite ses modèles à partir des résultats réels d'exploitation de quatre de ses systèmes. Il est probable que cette “modélisation” était efficiente puisque la fertilité, à cette époque, était essentiellement gérée via les restitutions organiques d'origine végétale ou animale, et non par la fertilisation minérale.

Rappelons enfin (1) que **Thaer** a joué un rôle majeur dans le développement du machinisme agricole et qu'il est le fondateur des écoles agronomiques allemandes qui serviront d'exemples aux autres pays.

Sur le plan des doctrines agricoles, la “théorie de l'humus” a prévalu toute la première moitié du dix-neuvième siècle.

1.4. De **Thaer** à **Liebig**, un agronome peu cité : **Martin**.

Comme transition entre la “théorie de l'humus” largement diffusée et la “théorie minérale” qui n'est pas encore clairement exprimée, il faut citer **Martin** (1829). Cet auteur est remarquable et précurseur en bien des points.

Il affirme clairement que la plante prend l'essentiel de ses substances carbonées dans l'air et l'eau. Mais il accorde un rôle majeur à l'humus dans la nutrition de la plante en tant que fournisseur de gaz carbonique à l'atmosphère. La conséquence pratique de cette “théorie de l'humus” déjà “minérale” est que la gestion de la fertilité passe par des restitutions organiques au sol. Celles-ci sont nommées “engrais nutritifs”, alors que les

apports minéraux sont nommés "stimulants". Pour ces derniers, les quantités à apporter doivent être évaluées à partir de l'analyse de la composition des cendres des matières végétales exportées.

Il développe aussi l'idée que la notion de fertilité du sol est tout à fait relative, et que l'on doit prendre en compte, en même temps, l'exposition, le climat, le sol, etc.. Sur l'utilité de l'analyse des sols, il écrit : "ces analyses ne sont pas aussi instructives qu'elles pourraient l'être ... car ... elles ne mentionnent ni la couleur du sol, ni sa position (pente ou plaine), ni la nature des couches inférieures".

1.5. La "théorie de la nutrition minérale de la plante" et ses implications agronomiques

En 1840, la "Théorie de la nutrition minérale de la plante" de **Liebig** sonna le glas de la "théorie de l'humus" et conduisit à l'ère de la fertilisation par les engrais chimiques. Les "minéralistes" ont remporté une victoire. Je ne développerai pas cette partie qui est largement documentée dans tous les traités historiques sur l'agronomie et les doctrines agricoles (1, 10).

Il faut tout de même signaler que, dès la parution des travaux de **Liebig**, si la majorité des agronomes s'accordaient sur les fondements théoriques de la nutrition minérale des plantes, un certain nombre s'interrogeaient sur les conséquences, en termes de gestion des sols, de l'emploi exclusif des engrais minéraux. Les propos de **Grandeau** (1878, pp. 325 à 333) sur les "exagérations" de **Ville**, grand adepte de la fertilisation minérale (1853, 1867), sont significatives à cet égard : "Pour ma part, je ne saurais trop m'élever contre les dangereuses assertions de M.G. **Ville** en ce qui concerne le fumier de ferme et la possibilité de s'en passer dans une exploitation normale". En effet, **Grandeau**, dans le mémoire cité, propose une théorie qui réconcilie "théorie de l'humus" et "théorie minérale", en attribuant un rôle essentiel à l'humus comme facteur de solubilisation, et donc d'assimilabilité, des éléments minéraux naturellement peu disponibles pour la plante. C'est la création du concept de "biodisponibilité". Il reçoit d'ailleurs, à ce sujet, une lettre d'accord et de félicitations de **Liebig**.

2. L'HUMUS ET LA RECHERCHE DE SA FORMULE

Avec le fort développement des connaissances et des outils de la chimie à partir de la fin du dix-huitième siècle et l'intérêt renouvelé sur les problèmes de fertilité, il n'est pas étonnant de voir les plus grands chimistes, depuis cette époque et jusqu'à nos jours, se consacrer à la recherche de la composition de l'humus. Peu de substances naturelles auront autant passionné les chimistes. Aussi, de nombreuses études historiques lui ont été consacrées (9, 13, 14, 19, 20), et nous évoquerons seulement ici quelques aspects historiques.

2.1. Le catalogue des substances humiques

C'est probablement **Achard**, en 1786, qui ouvrit la longue liste des travaux sur le fractionnement de la MOS en extrayant une tourbe par une solution alcaline qui, après acidification, permet l'obtention d'un précipité amorphe et noir : l'ère des fractionnements humiques de la MOS était née.

Le vocabulaire et les constituants spécifiques de l'humus sont vite devenus abondants. À chaque chimiste, ses méthodes d'extraction (solutions minérales ou organiques), ses constituants et sa nomenclature. Sans en donner le détail ici, nous avons récapitulé plus de 25 appellations de différents constituants humiques des sols, des eaux et des fumures organiques (9).

Cette profusion de vocabulaire et de méthodes d'extraction montre la difficulté d'isoler des composés chimiquement bien définis, dont la composition ne varie pas, ou peu, selon la nature du substrat ou le moindre détail du protocole opératoire. Elle révèle aussi la complexité de ce constituant qui, comme tout ce qui appartient au sol, a la caractéristique d'un continuum et non d'un objet fini (**Pédro**, 1996). Aussi, après presque deux siècles d'étude, avec la création en 1983 de la "Société internationale des Substances humiques (IHSS)", des recherches ont été mises en place, au niveau international, pour une standardisation des procédures d'extraction et de définition des substances humiques.

2.2. Les composés humiques contiennent-ils de l'azote organique ?

Dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle, et en relation avec l'origine de l'azote des plantes, on s'interrogeait sur le caractère azoté des substances humiques.

Ainsi, dès 1840, **Mulder** propose des compositions élémentaires pour l'ulmine ($C_{24}H_{32}O_{11}$), l'humine ($C_{40}H_{30}O_{15}$) et l'acide apocrénique ($C_{24}H_{12}O_{12}$) où l'azote n'apparaît pas. Pendant la seconde moitié du dix-neuvième siècle et le début du vingtième, la question de l'azote comme constituant naturel ou comme impureté saline des substances humiques est conflictuelle et largement débattue. En 1919, **Oden** proposa une formule pour l'acide humique où l'azote n'était pas encore représenté. À l'opposé, **Maillard** (1913), dans sa thèse "Genèse des matières protéiques et des matières humiques", estime que "l'azote est au contraire le premier facteur de l'humification naturelle qui, sans lui, n'aurait pas lieu" (p. 422). Selon **Maillard**, les composés humiques sont des polymères azotés issus de la réaction chimique d'acides aminés avec des sucres. Il précisa aussi que c'est justement la présence d'azote qui distingue les composés humiques isolés des sols ou des terreaux des substances noirâtres obtenues artificiellement par chauffage des sucres (caramélisation) ou par traitements aux acides et alcalis des produits ligneux. Les travaux d'**Andreux** (1978) sur la synthèse chimique des constituants humiques à partir de composés simples azotés et de sucres ou phénols furent tout à fait dans la continuité de ceux de **Maillard**.

Cette question de l'azote a amené le développement de méthodes spécifiques d'étude des formes organiques de l'azote du sol. Elles consistent en des hydrolyses acides (HCl, H_2SO_4) de la MOS (**Jodidi**, 1909, 1911, 1912) et sont toujours très employées (**Bremner**, 1965 ; **Jocteur-Monrozier**, 1984).

On sait aussi maintenant que les MOS incorporent du soufre et du phosphore organique.

2.3. L'humus est-il d'origine microbienne ?

En 1877, dans une expérience célèbre sur l'épuration des eaux d'égout, **Schloesing** et **Müntz** démontrent le rôle majeur des bactéries dans le processus de nitrification. Les transformations des MO sont donc

sous la dépendance des activités bactériennes, avec, en conséquence, les possibilités d'une origine microbienne d'une partie de l'humus. Cette question a fait l'objet de larges débats.

La présence de substances humiques dans des champignons du sol aurait été déjà observée vers 1840 par **Braconnot** et **Lucas** (20, p. 33) ; **Kostychev** (1886) serait le premier à avoir démontré la participation des métabolites bactériens à la formation des substances humiques (13, p.26). Toutefois, **Maillard** (1913) estime que les micro-organismes n'interviennent que dans la phase de décomposition des débris végétaux car "la formation des matières humiques consiste en une réaction chimique automatique où les micro-organismes n'ont à intervenir en aucune façon ... c'est un phénomène aseptique ... et ... anaérobie" (14, p. 376). À l'opposé, **Trusov** (1916) émet l'hypothèse de deux sources de MO pour l'humus : l'une dérivant du plasma microbien, l'autre étant héritée des constituants végétaux à caractère aromatique et ayant résisté à la décomposition microbienne (tanins, lignine, etc.). C'est aussi l'hypothèse soutenue par **Dumont** (1913) qui distingue l'"humus originel", formé des débris ou composants végétaux ayant résisté à la décomposition, de l'"humus microbien" formé par "les cadavres, dépouilles, moisissures et ferments qui pullulent dans la terre arable (p.125)... et c'est de là que proviennent les composés humiques actifs et la matière azotée nitrifiable. Dans ma pensée, je n'hésite pas à le dire, c'est l'humus microbien qui intéresse le plus directement la chimie agrologique (p. 145)". Cette dernière phrase est vraiment extraordinaire car elle rejoint complètement l'idée actuelle (cf. infra) d'un rôle majeur du compartiment biomasse microbienne et de ses métabolites en tant que réserve d'azote facilement minéralisable.

Pendant tout le vingtième siècle, de nombreuses études traiteront du rôle de la microflore et des enzymes du sol dans les processus de décomposition de la MO et de la synthèse des constituants humiques. La "théorie du complexe ligno-protéique" de **Waksman** en est une illustration : "*a purely microbiological theory has been proposed in which even greater importance is attached to the activities of microorganisms in the formation of humus as agents of decomposition and of synthesis*" (20, p. 105).

Les synthèses de composés bactériens et fongiques présentant des caractéristiques similaires aux composés humiques ("*humus-like substances*") sont maintenant bien démontrées (**Haider** et **Martin**, 1967), ainsi que l'incorporation des métabolites microbiens aux composés humiques du sol, grâce en particulier à l'utilisation des techniques isotopiques (**Amato** et **Ladd**, 1980 ; **Ladd et al.**, 1981). Enfin, les travaux de **Cheshire** (1979), **Turchenek** et **Oades** (1979) et de leurs collègues sur les sucres des sols permettent de considérer que certains sucres neutres des sols seraient plutôt d'origine microbienne (mannose, rhamnose) et d'autres d'origine végétale (xylose, arabinose). On dispose ainsi de traceurs semi-quantitatifs pour évaluer l'importance des métabolites microbiens dans la MOS ou dans certains de ses compartiments.

2.4. Les nouveaux outils d'analyse au vingtième siècle et l'avancée dans la connaissance de la structure des substances humiques

Avec le développement de la biochimie, de la chimie physique et des moyens analytiques, des progrès substantiels dans la connaissance de

la composition et de la structure des substances humiques ont été faits et sont en cours.

Leur nature chimique a été fortement précisée grâce aux travaux de **Waksman** (1936) sur la composition en polymères d'origine végétale (cellulose, lignine, etc.), à l'analyse de monomères obtenus par des méthodes d'hydrolyse (acide ou alcaline), à la mise au point de méthodes de quantification des groupes fonctionnels organiques (COOH, OH, etc.) et de l'utilisation de diverses méthodes physico-chimiques et spectroscopiques. Une mention spéciale doit être faite : (i) des travaux biochimiques de **Flaig, Haider** et leur équipe (**Flaig et al.**, 1975 ; **Haider**, 1996) sur le processus et les produits de dégradation de la lignine et leur incorporation aux substances humiques, (ii) de l'ensemble de l'œuvre de **Schnitzer** (**Schnitzer**, 1978 ; **Schnitzer et Khan**, 1972, 1978) sur leur composition, (iii) des études de **Cheshire** (1979), de **Oades** (1984) et de leurs collègues sur le rôle des hydrates de carbone dans les processus d'humification et d'agrégation.

La synthèse des connaissances est régulièrement exprimée par des modèles de structure chimique (**Fuchs**, 1932 ; **Thiele et Kettner**, 1953 ; **Felbeck**, 1965 ; **Haworth**, 1970 ; **Schnitzer**, 1978 ; **Schulten**, 1996, 1997). Toutes ces données ont été acquises grâce, en particulier, au développement de nouveaux outils d'analyses physico-chimiques : chromatographie en phase gazeuse, techniques pyrolytiques, spectrométrie de masse, résonance magnétique nucléaire (RMN) du proton, du phosphore 31 et du carbone 13 à l'état solide ou liquide (**Theng et al.**, 1989 ; **Malcolm**, 1990 ; **Zech et al.**, 1990 ; **Kögel-Knabner et al.**, 1991 ; **Schulten**, 1996). Ainsi, **Schnitzer** (1991), dans un article intitulé "*Soil organic matter - The next 75 years*", décrit le "laboratoire matière organique des sols du futur" comme principalement équipé d'appareils de spectrométrie permettant d'analyser la MOS à l'état solide et en limitant les extractions chimiques.

3. L'HUMUS ET LA RECHERCHE DE COMPARTIMENTS BIOLOGIQUES OU ORGANIQUES "FONCTIONNELS" DES SOLS

Si l'on connaît depuis longtemps le rôle important joué par la MO dans les propriétés des sols, on n'a pas encore de schéma conceptuel général qui permette d'attribuer clairement à l'un(e) ou l'autre des ses constituants ou fractions, un (ou des) rôle(s) spécifique(s) vis-à-vis du fonctionnement actuel des sols. Autrement dit, on ne connaît encore que très imparfaitement la nature des compartiments organiques ou biologiques "fonctionnels" des sols, en particulier des sols cultivés. De nombreuses recherches actuelles sur la MO et l'activité biologique des sols visent à combler cette lacune. Elles se développent dans trois directions, d'ailleurs de plus en plus intégrées, mettant en œuvre des approches faunistiques, microbiennes et organiques du sol. Ce sont les deux dernières que nous développerons ici¹

¹ Concernant la faune, il faut rappeler que, depuis ses premiers travaux en 1837 jusqu'à la publication de son célèbre ouvrage en 1881, **Darwin** eut une approche totalement fonctionnelle du rôle de la faune (vers de terre), non seulement pour les propriétés des sols, mais aussi pour les cycles d'érosion-sédimentation et le façonnement des paysages.

3.1. La recherche de compartiments microbiens “fonctionnels” : quantification de la “biomasse microbienne” et concept d’“habitats microbiens”

Grâce aux travaux déjà mentionnés de **Schloesing** et **Müntz** en 1877, on sait le rôle majeur des bactéries dans le processus de nitrification. Très rapidement, il devint évident que la plupart des cycles géochimiques internes au sol sont sous la dépendance des activités microbiennes. Et pourtant, il faudra attendre les années soixante pour voir se développer, avec **Jenkinson** (1966) et son équipe, des techniques simples de **quantification du compartiment microbien des sols**. Les publications basées sur ces techniques sont de plus en plus nombreuses. La méthode biocidale de **Jenkinson** (12) est basée sur une fumigation du sol par le chloroforme, qui tue les microorganismes présents à l’instant de l’expérimentation, suivie par une incubation d’échantillons² fumigés et non fumigés qui permet de quantifier, à partir du dégagement de carbone sous forme de CO₂ ou de l’azote minéral formé, obtenus dans des conditions standard, la quantité de C et N provenant de la biomasse microbienne. On considère, en effet, que la nécromasse microbienne est très aisément minéralisable.

Ces techniques trouvent leur origine dans des travaux anciens. En effet, suite aux travaux de **Pasteur**, le chloroforme (ou d’autres anti-septiques et la chaleur) a été rapidement utilisé par **Müntz** (1875) et **Schloesing** et **Müntz** (1877) pour juger de l’intervention des bactéries dans les processus de décomposition de la MO des eaux et des sols. De très nombreuses expériences ont été faites aussi par **Wollny** (1902) à ce sujet. Par ailleurs, **Deherain** et **Demoussy** (1896) ont montré que le dégagement de CO₂ est deux à cinq fois plus élevé dans un sol qui vient d’être stérilisé que dans le sol non traité. Enfin, dès 1905, **Stoklasa** et **Ernest** assimilent le carbone minéralisable sous forme de CO₂ à une fraction de MO dite “disponible” dans les sols.

Tout semblait donc réuni pour que le concept de “biomasse microbienne” émerge soixante ans plus tôt. Mais en fait, à cette époque, la problématique d’identification et de quantification de compartiments organiques à taux de renouvellement (*turn-over*) élevés n’était pas vraiment posée. Il faudra le développement des techniques isotopiques, à partir des années cinquante, pour que l’on dispose d’outils performants pour une approche renouvelée et dynamique des compartiments organiques du sol.

Parmi les aspects les plus récents de l’approche microbiologique, il faut aussi mentionner l’émergence de la notion d’“habitats microbiens” du sol grâce à l’observation en microscopie électronique de divers volumes de sols : zone rhizosphérique (**Foster** et **Rovira**, 1973 ; **Guckert et al.**, 1975), agrégats naturels (**Foster**, 1978, 1981 ; **Emerson et al.**, 1986), etc.. Une importante revue bibliographique en a été faite par **Stotzky** (1986).

3.2. La recherche de compartiments organiques “fonctionnels” : les fractionnements physiques de la MOS

Avec l’essor extraordinaire de la chimie depuis le début du dix-neuvième siècle, la caractérisation de la MOS s’est faite essentiellement jusqu’aux années soixante à partir de fractionnements chimiques de type

² Des méthodes alternatives existent aussi, qui ne sont pas basées sur l’incubation, mais sur l’extraction des composés solubles produite par traitement biocide (**Sparting**, 1985).

extractions et hydrolyses acides et alcalines. Les fractionnements humiques, en particulier, ont représenté un outil essentiel pour les études de pédogenèse, la typologie et l'écologie du sol, tant sous les climats froids et tempérés (**Duchaufour**, 1970b) que tropicaux (**Thomann**, 1964 ; **Perraud**, 1971 ; **Turenne**, 1977 ; **Dabin**, 1980, 1981). Ces techniques, toujours d'actualité, sont particulièrement appliquées de nos jours à divers aspects des biogéosciences tels que l'étude de flux de MO solubles dans les grands bassins continentaux et les eaux marines, ou la réactivité des substances organiques des eaux et des sols vis-à-vis de micropolluants (cf. exposé de **F. Andreux**). Elles ont été aussi appliquées à l'étude des sols agricoles (**Jacquín**, 1985, 1996).

Toutefois, dès 1843, **Gasparin** (p. 125) s'interroge sur la signification des extractions humiques. Plus récemment, un certain nombre de chercheurs (**Tiessen et Stewart**, 1983 ; **Anderson et al.**, 1983), dans le domaine de l'agro-pédologie, ont estimé que la seule caractérisation de la MOS par des fractionnements chimiques n'apportait pas les informations suffisantes à une compréhension du rôle joué par la MO dans les évolutions observées, souvent à court terme, sous culture, telles que, par exemple, les modifications de la stabilité structurale, des propriétés d'échange ou des cycles microbiens de minéralisation-immobilisation. Autrement dit, ces fractions ne seraient pas représentatives de **compartiments organiques fonctionnels**. Ceci tient probablement à deux aspects, l'un d'ordre méthodologique, l'autre lié aux caractéristiques des fractions séparées :

- le protocole même du fractionnement, qui solubilise et sépare la MO du substrat minéral, risque d'induire de fortes modifications des propriétés de surface des associations organo-minérales, associations qui jouent un rôle capital dans la majorité des processus qui nous intéressent ;

- pour des raisons de structure chimique et/ou de protection physique des MO, on sait maintenant que le *turn-over* des fractions humiques des horizons de surface est souvent relativement lent (quelques dizaines à centaines d'années) comparé à celui des organismes vivants du sol (bactéries, racines) ou de leurs métabolites ou résidus (0,3 à trois ans selon **Anderson et Paul**, 1984 ; **Duxbury et al.**, 1989). Aussi, l'importance de la participation des constituants humiques aux processus à dynamiques rapides tels que la minéralisation à court terme de la MO, les variations saisonnières de la structure n'est toujours pas clairement assurée.

Par ailleurs, des approches partielles, telles que celle basée uniquement sur la biomasse microbienne, ne concernent qu'environ 2 % de la MO totale du sol (**Sparling**, 1985), et il reste à identifier les fonctions de la majeure partie de la MOS.

Sur la base de ces constatations, une approche très différente de la MOS s'est développée depuis maintenant deux à trois décennies, sur laquelle nous voudrions un peu insister.

Elle est basée sur des fractionnements granulométriques (tamisages et sédimentation) et/ou densimétriques du sol. En schématisant fortement, les fractions organiques et organo-minérales obtenues s'avèrent être très différenciées par :

- leur morphologie : débris végétaux plus ou moins décomposés (fraction légère ou de taille supérieure à 50 μm) ou complexe organo-limonargileux (fraction dense ou de taille inférieure à 50 μm) ;

- leur origine : héritage végétal dominant (débris végétaux) pour les fractions légères ou de taille supérieure à 50 μm , héritage fongique pour le complexe organo-limoneux et plutôt bactérien pour le complexe organo-argileux ;

- leur composition chimique : C/N, C/P, C/S élevés pour les débris végétaux, faibles pour le complexe organo-argileux, et intermédiaires pour le complexe organo-limoneux ;

- leurs propriétés physico-chimiques : faible réactivité de surface pour les fractions légères ou grossières, forte pour les fractions denses ou fines ;

- leur *turn-over* : généralement rapide pour les débris végétaux (mais dépendant de leur composition : rapport C/N, teneurs en lignine, tanin, lipide, etc.), plus lent pour le complexe organo-limono-argileux.

Tout ceci contribue à donner à ce type de fraction un caractère fonctionnel plus marqué que les approches antérieures par fractionnement chimique.

Les aspects historiques de cette approche ont été largement développés dans un article récent (9). Parmi les travaux précurseurs, il faut citer ceux de **Martin** (1829), de **Gain** (1918), mais surtout de **Schloesing** en 1874 (17).

Ainsi, afin de préciser le rôle de la MOS dans le processus de floculation des argiles, **Schloesing** s'interroge sur "la répartition de la matière organique entre le sable et l'argile". Il réalise, dans de bonnes conditions expérimentales et avec esprit critique, le premier fractionnement granulométrique de la MOS. Ce travail pourrait être publié de nos jours. Il distingue cinq fractions de la MOS qu'il nomme : "gros sable", "sable fin", "écaille" (fraction légère à la surface des "sables fins" et se détachant en "écailles" après séchage) et "deux dépôts d'argile". Les résultats sont présentés en deux tableaux avec les bilans pondéraux, les teneurs en C et N par gramme de fraction et les teneurs en C et N par gramme du sol. Une des conclusions de **Schloesing** est que : "...l'argile contient 69 % de matière organique ; c'est assez pour qu'elle soit réellement modifiée dans sa manière d'agir comme ciment". On est là en présence d'une approche clairement fonctionnelle des compartiments organiques du sol.

Mais, c'est à partir de 1940 que la nécessité d'une séparation des MO "libres" et des MO "liées" est clairement affichée.

3.3. Les fractionnements densimétriques

Dès 1950, **Hénin** et **Turc**, reprenant une méthodologie développée par **Lein** (1940), proposent la séparation, par densimétrie à l'aide de mélanges benzène-chloroforme, d'une fraction "légère" ($d < 1,75$), dite "MO libre", très riche en MO (30-35g C/100g fraction), à rapport C/N supérieur à 16, et formée essentiellement de débris végétaux, d'une fraction "dense" ($d > 1,75$), appelée "MO liée aux matières minérales", moins riche en MO (0,7-16g C/100g fraction), à rapport C/N inférieur à 11, plus "évoluée" que la fraction légère et "constituée en particulier du complexe argilo-humique". En trois pages et trois exemples, nous avons une illustration, à la fois fondamentale et agronomique, de l'intérêt des fractionnements physiques pour l'étude de la MOS.

Cette approche densimétrique a été essentiellement développée entre 1950 et 1970 par des scientifiques français (**Monnier et al.**, 1962 ; **Duchaufour et Jacquin**, 1966 ; **Dabin**, 1971), comme une étape préliminaire aux fractionnements humiques. Dans la continuité de cette approche, **Greenland et Ford** (1964) et **Ford et al.** (1969) améliorent la séparation des MO “libres” en associant l’ultrasonication à la densimétrie. Cependant, l’utilisation des liqueurs denses organiques ou minérales pose le problème de possibles contaminations, solubilisations ou dénaturations des fractions. Ceci explique peut-être la diffusion internationale limitée de cette approche.

3.4. Les fractionnements granulométriques

Edwards et Bremner (1964, 1967a), reprenant et développant des travaux déjà anciens (**Whittles**, 1923) sur le rôle dispersant des ultrasons, montrent qu’il est possible, par simple application d’ultrasons sur une suspension de sol dans l’eau, d’obtenir une dispersion complète du sol sans destruction préalable de la MO et sans ajout de dispersant chimique. **On peut donc séparer les fractions granulométriques du sol avec les MO qui y sont associées.** Ce travail est d’une importance capitale, car il offre une méthodologie permettant de localiser la MO par rapport à la granulométrie des constituants minéraux, et ce sans aucune intervention de réactions chimiques susceptibles de dénaturer les constituants organiques ou minéraux. C’est en même temps la possibilité de donner une réalité au concept de “complexe argilo-humique” par l’étude des fractions organo-argileuses naturelles. C’est enfin le moyen, en jouant sur les énergies de dispersion mises en jeu (simples agitations dans l’eau, avec ou sans billes, ou action des ultrasons), d’étudier les MO associées à des agrégats ou microagrégats de différentes stabilités (**Edwards et Bremner**, 1967b).

À la suite de ces travaux, il est apparu très rapidement (**Chichester**, 1969 ; **McKeague**, 1971 ; **Watson et Parsons**, 1974) que les MO associées aux fractions de tailles supérieures à 50 µm étaient essentiellement sous forme de débris végétaux plus ou moins décomposés, avec des rapports C/N souvent supérieurs à 15, tandis que les MO associées aux argiles présentaient des rapports C/N plus faibles, généralement inférieurs à 10. Ce fractionnement granulométrique dans l’eau permet, comme le fractionnement densimétrique, mais sans les artefacts qui y sont liés, de séparer des MO à caractère végétal figuré (plus ou moins équivalentes aux “MO libres”) et de tailles supérieures à 50 µm, de MO plus fortement associées aux colloïdes minéraux (plus ou moins équivalentes aux “MO liées”), et de tailles inférieures à 50 µm. Afin de préciser la nature de ces fractions, divers auteurs (**McKeague**, 1971 ; **Turchenek et Oades**, 1974, 1979 ; **Spycher et Young**, 1977) ont associé séparations granulométriques et densimétriques. D’autres ont fait varier les techniques de dispersion par utilisation de billes d’agate (**Bruckert et al.**, 1978 ; **Bruckert**, 1979) ou de résine sous forme sodique (**Feller**, 1991 ; **Gavinelli et al.**, 1995), avec le souci de limiter l’effet destructeur des ultrasons sur les débris végétaux du sol (**Balesdent et al.**, 1991 ; **Feller et al.**, 1991 ; **Gavinelli et al.**, 1995).

À l’heure actuelle, de nombreuses caractérisations morphologiques, chimiques, physiques et biologiques sont développées en association avec l’approche physique pour analyser le rôle de la MOS dans les cycles

biogéochimiques et la macro- et microagrégation. Les techniques microscopiques et ultramicroscopiques permettent de préciser la nature des MOS et ses relations avec les constituants biologiques et minéraux dans les fractions granulométriques (**Emerson et al.**, 1986 ; **Tiessen et Stewart**, 1988 ; **Santos et al.**, 1989 ; **Feller et al.**, 1991b) ou les agrégats (**Golchin et al.**, 1994 ; **Puget et al.**, 1995). L'utilisation des traceurs isotopiques naturels ^{13}C et ^{15}N ont permis, cette dernière décennie (**Balesdent et al.**, 1987 ; **Mariotti**, 1991 ; **Golchin et al.**, 1994 ; **Puget et al.**, 1995), de spectaculaires avancées dans la connaissance de l'origine et de la dynamique *in situ* des MO des sols (cf. exposé de Jérôme **Balesdent**).

Une évaluation quantitative du caractère fonctionnel de ces fractions vis-à-vis des processus de minéralisation-immobilisation, d'échange, de sorption, de réserves en nutriments, etc., tenant compte de la texture du sol, a été récemment proposée par **Feller** (1995) pour des sols ferrallitiques tropicaux.

CONCLUSION

Après que **Thaer** ait clairement défini la notion d'humus en tant que constituant (MOS), nous avons vu comment cette notion a sous-tendu une théorie fautive, la "théorie de l'humus", de la nutrition des plantes. Mais, curieusement, à partir de ces bases théoriques fautes, **Thaer** réussit à élaborer, dans le contexte agricole de son époque, un véritable et remarquable travail précurseur de modélisation du fonctionnement des systèmes d'exploitation basé sur des bilans organiques.

Les recherches sur la composition de la MOS ont été fortement associées au développement des techniques de la chimie et de la biochimie, de la microbiologie et de toutes les techniques analytiques physico-chimiques et ultramicroscopiques récentes. On a pu distinguer trois approches différentes de la MOS, qui sont, maintenant, de plus en plus souvent intégrées :

- l'approche "humique", la plus ancienne, conduit à séparer des fractions de MO fortement transformées et relativement stables des sols. Elle a permis de mettre en relation les processus de pédogenèse avec la composition de la MOS. Elle est encore d'un grand intérêt dans tout ce qui concerne les processus liés à la présence de MO soluble dans les eaux et les sols (cf. exposé de Francis **Andreux**). Cependant, elle est apparue peu explicative quant aux effets de l'action anthropique sur les propriétés des sols qui font intervenir les MO sous formes solides, "libres" ou "liées" aux particules minérales. Cette approche ne conduit pas, ou peu, à l'identification de "compartiments organiques fonctionnels" ;

- depuis la fin du dix-neuvième siècle, le rôle de la microflore dans les cycles biogéochimiques a été clairement établi. Mais c'est depuis 1960, avec la quantification de la "biomasse microbienne", que l'on a pu identifier un compartiment très actif, car riche en nutriments très facilement disponibles pour la plante et les autres organismes du sol, et à taux de renouvellement extrêmement rapide ;

– enfin, les approches physiques, granulométriques et densimétriques, développées plus récemment, conduisent à séparer des fractions organiques et organo-minérales très différenciées quant à leur origine, leur morphologie, leurs propriétés et leur dynamique. Ces approches apparaissent donc, à priori, prometteuses pour l'identification de compartiments organiques fonctionnels des sols. Elles s'avèrent particulièrement bien adaptées à l'analyse du rôle de la MOS dans l'évolution des sols sous cultures. Mais les travaux de quantification du caractère fonctionnel de ces compartiments sont encore trop peu nombreux et vont, probablement, se développer fortement ces prochaines années dans différents contextes agro-écologiques.

Intégrant l'ensemble des connaissances et techniques actuelles, et tentant de répondre à des questions environnementales nouvelles, des modèles conceptuels globaux des cycles biogéochimiques majeurs sont aussi élaborés.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Anne-Lise **Viala** pour son aide dans la dactylographie de ce texte, Marie-Christine **Larre-Larrouy** pour la traduction anglaise du résumé et Elisabeth **Ambert** et Christel **Hely** pour une recherche bibliométrique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Pour des raisons de longueur de texte, il était impossible de présenter la liste complète des références citées dans le texte. Seules les publications à caractère historique, ou particulièrement importantes pour cet article, sont donc données ci-dessous. La liste complète peut être demandée à l'auteur.

- (1) BOULAIN J., 1989. – Histoire des pédologues et de la science des sols. Inra, 285 p..
- (2) CHRISTENSEN B.T., 1992. – Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *In Advances in Soil Science*, Vol. 20, Springer-Verlag, N.Y..
- (3) DABIN B., 1971. – Étude d'une méthode d'extraction des matières humiques du sol. *Science du Sol*, **1**, 47-63.
- (4) DARWIN C., 1897. – The formation of vegetable mould through the action of worms with observations of their habits. J. Murray Eds., 13th Thousand, London, 328 p. (première édition en 1881).
- (5) DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1966. – Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. ENSA Nancy VIII* (1), 3-24.
- (6) EDWARDS A.P., BREMNER J.M., 1964. – Use of sonic vibration for separation of soil particles. *Can. J. Soil Sci.*, **44**, 366.
- (7) ELLIOTT E.T., CAMBARDELLA C.A., 1991. – Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosystems Environ.*, **34**, 407-419.
- (8) FELLER C., BOULAIN J., 1987. – La réapparition du mot humus au XVIII^e siècle et sa signification agronomique. *Revue Forestière Française*, **29** (6), 487-495.
- (9) FELLER C., 1997. – The concept of soil humus in the past three centuries. *Advances in GeoEcology*, **29**, 15-46.
- (10) GRANDEAU L., 1879. – Chimie et physiologie appliquées à l'agriculture et à la sylviculture. 1. La nutrition de la plante. Berger-Levrault et Cie, Paris, 624 p..
- (11) HENIN S., TURC L., 1950. – Essais de fractionnement des matières organiques du sol. *Trans. 4th Int. Congr. Soil Sci.*, **1**, 152-154.
- (12) JENKINSON D.S., 1966. – Studies on the decomposition of plant material in soil. 2. Partial sterilization of soil and the soil biomass. *J. Soil Sci.*, **17**, 280-302.
- (13) KONONOVA M.M., 1961. – Soil organic matter, its nature, its role in soil formation and in soil fertility. 2nd Éd. Pergamon, Oxford, 505 p..
- (14) MAILLARD L.C., 1913. – Genèse des matières protéiques et des matières humiques. Masson Éd., Paris, 423 p..
- (15) MARTIN A.E., 1829. – Traité théorique et pratique des amendements et des engrais. Rousseton Libr. Éd., Paris, 576 p..
- (16) ROZIER l'Abbé, 1781-1805. – Cours complet d'agriculture théorique, pratique, économique et de médecine rurale et vétérinaire. Paris, 12 t..
- (17) SCHLOESING Th., 1874. – Étude sur la terre végétale. *Ann. Chim. Phys.*, 5ème série, t. 2, 514-546.
- (18) THAER A., 1811. – Principes raisonnés d'agriculture. Trad. de l'allemand par E.V.B. Crud, J.J. Prechoud Éd., Paris, 4 t. (1811-1816).
- (19) VAUGHAN D., ORD B.G., 1985. – Soil organic matter. A perspective on its nature, extraction, turn-over and role in soil fertility. *In Soil Organic Matter and Biological Activity*, 1-36. D. Vaughan et R.E. Malcom Eds., M. Nijhoff and D.W. Junk Publ., Dordrecht, 469 p..
- (20) WAKSMAN S.A., 1936. – humus. Origin, chemical composition and importance in nature. Baillière, Tindall and Cox, London, 494 p..

(Reçu le 23 septembre 1997, accepté le 2 octobre 1997)