

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté de Foresterie et de Géomatique

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

« *Évolution des concepts d'humus et de fertilité sur trois siècles dans une optique de rendements soutenus* »

par

Christian Feller et
Centro da Energia Nuclear na Agricultura
Piraciaba, Brésil

Raphaël Manlay
ENGREF, Montpellier
France

Traduction de l'anglais

par le

PROFESSEUR GILLES LEMIEUX

novembre 2001

Publication n° 146

<http://www.sbf.ulaval.ca/brf/>

édité par le

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux

UNIVERSITÉ LAVAL

Département des Sciences du Bois et de la Forêt

Québec G1K 7P4

QUÉBEC Canada

INTRODUCTION

Avec l'autorisation des auteurs, j'ai procédé à la traduction française, d'un texte rédigé en anglais par des auteurs français, comme il est indiqué en sous-titre. Ma demande visait avant tout à rapprocher de la terre, au sens agricole et forestier du terme, autant les paysans, les producteurs agricoles et les forestiers que les scientifiques du monde francophone qui se voient dépossédés de l'outil le plus précieux, celui de la langue, véhicule des idées, du savoir, des techniques et des cultures.

Comme l'ensemble de mes travaux portent sur la connaissance réelle de la nature des sols, dans une optique jamais développée à ce jour, le présent document invite à rappeler quelques vérités trop souvent absentes du discours collectif. La communication de Feller et Manlay exprime, clairement et sans ambages l'évolution lente de la connaissance des sols au cours de trois siècles surtout les détournements des connaissances au profit de la productivité des plantes et des animaux. Le travail exhaustif de ces auteurs, sous plusieurs angles, indique comment depuis un siècle on a négligé les connaissances de base et fondamentales concernant les sols. Timidement, ces auteurs ont touché la question énergétique en introduisant quelques notions sur la thermodynamique hors équilibre. Aucune trace de la base biochimique relative à la formation des humus que représente la chimie des polyphénols et en particulier celle des polyphénols polymères que sont les lignines, n'a été décelée.

Mes premiers travaux sur l'utilisation des BRF et leur évolution, il y a déjà plus de 20 ans, avaient suscité quelques questions, aucune curiosité sur le pourquoi d'une telle évolution. Cette évolution des BRF, par la suite, s'est révélée analogue en climats tropicaux. Pourtant, aucune question sur les mécanismes de base de la formation de l'humus n'a été soulevée.

Au départ, la pédogénèse m'intriguait et, avec mes collègues j'ai commencé à examiner et à analyser les développements récents de la science de la biochimie, de la biologie et de la physique. À ma grande surprise, j'ai retrouvé les techniques de compostage en vogue dans l'Égypte des pharaons mais toujours appliquées et glorifiées au nom d'un certain « progrès »...de l'Homo erectus.

Nous sommes redevables aux auteurs de ce travail à caractère historique d'avoir retracé sans ambiguïté l'évolution de la perception de l'humus au cours des siècles, mais toujours dans une seule optique : soit celle de la production de plantes pour l'homme et pour les animaux à son service. Cette vision agrico-agronomique cristallisée autour des travaux de Liebig et ceux de Schloesing a conduit aux compréhensions actuelles portées par l'évolution des connaissances en chimie générale en plein essor. Une autre vision importante apportée par tous les auteurs concerne les sols forestiers. La classification des humus proposée par Hundeshagen fut la première, mais elle n'a nullement contribué à augmenter les connaissances sur l'origine des différents types de sols et leurs raisons d'être. Plus tard, d'autres auteurs importants se sont penchés sur la question, comme Wilde, Kubiena, Duchaufour, mais ont tous versé dans la classification, pédogénétique pour l'un, chimique pour l'autre ou tout simplement physique. Aucun auteur, à notre connaissance n'a traité l'humus en tant qu'écosystème à dynamique multiple et reposant sur une série de règles universelles. Nous en voulons pour preuve, l'omniprésence du terme MATIÈRE ORGANIQUE dans toute la littérature tant agronomique que forestière. Cette **matière organique** traduit bien *l'ignorance fondamentale de l'humus* et de sa quadruple dynamique –physique, énergétique, biochimique et biologique.

À plusieurs égards, ce système est similaire à la dynamique des systèmes aquatiques sauf qu'il n'en a ni la mobilité des constituants biologiques, ni la régulation thermique et « nutritive ». L'apport énergétique est d'origine détritique et il est la source, en même temps, de la structure physique du milieu. Cet aspect détritique est constitué de manière privilégiée de polymères polyphénoliques, dont les lignines sont presque l'unique source. À vrai dire, ce modèle humique est à la base même de la et des rendements soutenus, puisque rien n'est plus durable et permanent que les écosystèmes forestiers, assurant productivité et préservation d'une dynamique biologique inscrite dans la biodiversité.

Tous les efforts pour décrire l'humus en termes statiques n'ont aucun sens, bien qu'ils soient privilégiés par la très grande majorité des auteurs comme le montre le travail de Feller et Manlay. Ce travail par ailleurs, illustre à merveille la raison pour laquelle nous avons toujours réagi et réagissons encore de cette manière. Tous les travaux présentent à peu de chose près, une description et une classification du sol et en tirent des renseignements concernant la nutrition des plantes en insistant sur l'azote et le phosphore. Des travaux antérieurs avaient montré que le carbone était la première source d'intérêt, et qu'il est toujours d'actualité, mais à une toute autre échelle.

Ces points étant acquis et les solutions proposées souvent analogues, la fertilité devient très importante sans toutefois se préoccuper de la structure dynamique du sol qui repose sur l'évolution de l'humus. En conséquence, cette logique a conduit tout droit aux solutions artificielles qui caractérisent si bien notre ère. Pour obvier à cette tendance, il s'est trouvé en Allemagne et en Angleterre, des personnages qui ont imaginé une **agriculture biologique** comme s'il pouvait en être autrement. Cette réaction caractéristique, bien des sociétés qui cessent ou refusent de participer à l'acquisition de connaissances nouvelles comme ce fut longtemps le cas pour la médecine. Aujourd'hui encore, la microbiologie considère tout comme des maladies potentielles, alors le que son domaine est lié à toute la vie sur terre.

Ne pas connaître à fond les mécanismes d'évolution de l'humus et tenir des discours enflammés sur les puits de carbone, cela fait sans doute partie de la bonne vieille nature humaine. Ainsi, nous balayons soigneusement sous la moquette un immense savoir en pièces détachées, ce qui nous autorise à refuser systématiquement de reconnaître l'importance de la pédogénèse et de tous les mécanismes universels qui la régissent sous tous les cieux.

Professeur Gilles Lemieux
Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux
Université Laval
Québec Canada

Évolution des concepts d'humus et de fertilité sur trois siècles dans une optique de rendements soutenus en agriculture.

FELLER, Christian¹; MANLAY, Raphaël²

¹Centro da Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP), Institut de Recherche et de Développement (IRD, ex ORSTOM), Caixa Postal 96 13400-970 Piraciaba, SP. Brésil tel. (00) +55) 19 433 2733

² ENGREF 5093, 34033 Montpellier CEDEX 1 France.

«As the man became civilised he failed to recognise that the world was given to him for usufruct aloe, not for his consumption, and still less for profligate waste. Erosion is one form of toll that man is paying for his extravagance. The extent of penalty did not become evident until the last of agricultural frontiers began to feel the effects of accelerated soil wastage» (Bennett, 1939)

1. Introduction

La dégradation de la terre est un processus anthropogène qui affecte toutes les composantes d'un écosystème : le sol, les plantes, les animaux, l'hydrosphère ainsi que l'atmosphère. La dégradation des sols, par exemple, soit la détérioration avec le temps, des éléments nécessaires à la croissance des plantes, ou à la qualité de l'environnement touche, selon WRI 2000, 40 % des terres agricoles du monde et elle cause la diminution des rendements des cultures de l'ordre de 16 %. Certains s'interrogent sur le caractère renouvelable du sol. Néanmoins, le déclin des civilisations a souvent été perçu par les

archéologues comme étant la conséquence de la dégradation des ressources édaphiques qui menèrent les sociétés à la limite de la survie (Olson 1981).

Le rôle de la matière organique du sol, ou humus, sert à mettre les ressources du sol à la disposition de l'agriculture et de l'environnement, pour assurer une base durable aux deux niveaux; le maintien de la fertilité et l'émission mitigée de carbone dans l'atmosphère, (Tiessen et al. [1994], Syers & Craswell [1995]. Ainsi, il y a une relation particulière des concepts régissant l'humus, la fertilité et la durabilité. Cependant, la reconnaissance scientifique des interactions et des implications quant à la définition des pratiques agricoles, ont varié avec le temps, en partie à cause de la difficulté de définir correctement les trois concepts.

L'objet du présent travail est de faire la revue des changements de perception du concept d'humus en relation avec la fertilité et les rendements soutenus, faisant appel à la notion de durabilité qui fait office de pendant anglais au terme de « *sustainability* ». D'une perspective historique, il faut convenir de changements dans la définition du concept d'humus. Il établit des liens entre les trois concepts aussi bien dans les sciences agricoles et la pratique sur la ferme. L'évolution de cette relation est surtout d'ordre historique qui s'étend sur trois siècles. Nous distinguons trois périodes : la première dite « période humique » s'arrête en 1840. La seconde période est dite « minéraliste » et va de 1840 à 1940. La troisième période qui va de 1940 à nos jours est dite « environnementaliste ».

2. Une revue historique de la signification du terme « humus » (Feller & Boulaïne, [1987], Feller, [1997a])

Le terme « humus » est d'étymologie latine. Jusqu'ici, il a été utilisé pour décrire trois différents concepts : l'humus comme horizon du sol (horizon humifère), comme constituant chimique et quelques fois comme principe.

Pour les Romains, Virgile, Pline l'Ancien et Columella, l'humus signifiait le sol ou la terre. C'est ainsi que Virgile a nommé les loams « *pinguis humus* » et utilisé de manière parfaitement interchangeables les termes *humus*, *solum* ou *terra* pour parler du sol ou de la terre. Au début du premier siècle, d'après Cicéron (106-43, l'humus dans le sens de sol disparaît progressivement et est remplacé par le terme de « *terra* » (Martin, [1941], Ce n'est qu'au XVIII^e siècle que le terme humus refait surface dans le vocabulaire scientifique européen, D'après plusieurs dictionnaires français, il réapparaît chez Diderot et d'Alembert, les auteurs de l'Encyclopédie (1765, vol. 8), signifiant « *terreau de jardin, ou terreau formé de la décomposition des plantes en référence à la couleur marron ou sombre de la terre en surface du sol. Se rapporte au terreau ou au terreau végétal* » Toutefois, le terme « humus » n'a pas été retenu immédiatement par le vocabulaire scientifique (chez les naturalistes ou en agriculture) et son utilisation était très restreinte à cette époque. Ce terme a été utilisé à diverses fins pour décrire le sol, comme horizon organique de surface ou comme constituant des sols organiques, sans autre commentaire. Jusqu'en 1781, le terme d'humus était rarement cité. Dans sa

classification minéralogique, Wallerius [1753] a utilisé le terme d'humus comme expression latine synonyme de terreau argileux ou de terreau végétal. Alors que Valmont de Bomare [1768] a utilisé le terme d'humus dans le sens de sol ou d'horizon du sol.

C'est entre 1781 et 1809 que le terme d'humus, d'origine latine, est admis dans la langue française. Ce terme fut largement utilisé par Rozier [1781-1805] dans les volumes de son « Cours d'Agriculture ». Toutefois, le terme ne fut pas répertorié dans l'index des volumes sous la lettre H, ce qui indique, en toute vraisemblance, qu'il était rarement utilisé à l'époque. Ce terme manquait de précision à cette époque désignant à la fois un terreau végétal, un terreau ou un constituant du sol.

Voici quelques citations à titre d'exemple :

..... « pour produire un terreau ou un humus, le seul terreau végétal » [vol, 1 506]... « un sol qui manque uniquement d'humus, terreau ou de terre soluble,....est la seule terre végétale. Les autres terres ne servent que de matrice pour les plantes » [vol. 1, 568]..... « une terre calcaire est ainsi le seul terreau végétal, l'humus parfait soluble dans l'eau et le seul à constituer et établir un cadre pour les plantes.....si les plantes sont empilées.....une décomposition s'engage.....nous en arriverons à une pure terre calcaire, l'humus parfait. Les paysans persistent à produire cet humus précieux qui est une véritable «terre animale» les seules présentes en leur composition (les plantes) [vol 9, 390-401].

Pour Patrin [1803], le terme « humus » se réfère au « sol»: « c'est l'ultime couche externe de la terrede laquelle se forme le sol lorsque la roche est

recouverte.....sa profondeur varie de deux à trois pouces à plusieurs pieds ... ».
Pour Virey (1803), l'humus est constitué de « débris de corps organisés ».De Saussure [1804] attribue une large signification au terme « humus » (l'ensemble du couvert végétal se décomposant) et une signification plus restreinte au terme « terreau » comme « la substance noire dans laquelle les plantes croissent ».

2.1. Le concept d'humus comme constituant du sol.

L'humus comme faisant partie du sol est un concept que l'on voit pour la première fois apparaître dans Thaër (1809) dans son ouvrage « Principes rationnels de l'agriculture » d'abord publié en allemand (1809) et en français (1811). C'était selon toutes les apparences, la première fois que Thaër utilisait le terme « humus » comme partie du sol : *Le terme usuel désignant cette substance est terreau, La signification du terme est très largement méconnu en tant que partie intégrante du sol comme couche de terre végétale plutôt qu'une substance formant la terre. Cette erreur s'est perpétuée dans les écrits d'éminents agronomes, ce qui amené à une mauvaise compréhension de ce domaine de la science., C'est la raison pour laquelle j'ai opté pour le terme « humus » qui ne peut prêter à équivoque. Généralement, l'utilisation scientifique du terme « terre » n'est pas pertinent à proprement parlé, ce n'est pas de la terre : ceci est dû à sa forme pulvérulente...L'humus est constitué des restes putréfiés d'animaux et de végétaux formant un corps noir.*

2.2 Le concept d'horizon humifère

Ce concept est apparu très tôt dans la littérature, mais ce n'est qu'au XIX^e siècle que son usage s'est répandu dans le sillage de la recherche forestière et l'émergence de la science du sol. On reconnaît à Wallerius [1753] d'avoir été le premier à proposer le terme « *d'humus* » dans sa classification « minéralogique ». Dans sa classe « *terrae* » il fait la description des « *Poussières de Terre* » (*Terrae macrae*) avec le genre loam ou terreau (ou humus) où il distingue sept espèces différentes.

D'après Wilde [1971], c'est Hundeshagen [1830] qui fut le premier à introduire une classification morphologique des humus forestiers avec deux types d'humus ayant des effets différents en sylviculture, À son tour Emeis [1875] décrit deux types d'humus dont le premier est formé de matériaux organiques associés à la partie minérale du sol (l'actuel mull), alors que le second est constitué uniquement de débris organiques. En parallèle, Ebermeyer [1876] mena en Bavière une étude détaillée des humus forestiers. Il a proposé alors une classification en « humus fertiles » en « humus poussiéreux ou tourbeux », en « humus acide » et en « humus astringent ». Par ses célèbres travaux, Müller [1879,1884] a établi les bases scientifiques de la classification actuelle des différents types d'humus, tout comme il a fait un survol des processus pédogénétiques en climats froid et tempéré. Dans son ouvrage « Les formes naturelles de l'humus : Il a traité des changements depuis les brunisols aux podzols. Les distinctions qu'il a proposées ne sont pas contestées de nos jours.

Il propose donc de nommer les deux principaux type d'humus en « *mull* » (terreau) et en « *Torf* » (tourbe). En danois, le terme de mull devient « *muld* » et celui de Torf devient « *mor* ».

Cela donna naissance à des descriptions détaillées des profils de sol, à des études microscopiques, à de nombreuses analyses mécaniques et chimiques, et à une étude (pp. 20-28) détaillée des organismes responsables de l'évolution des litières comme les mycéliums de fungus et les lombrics et ce avec des données quantitatives. Les formes de transition –mull-tourbe- (*mullartiger Torf*) font maintenant l'objet de description (pp.45-64). Ces formes contiennent peu de lombrics mais en revanche beaucoup de mycélium et de nombreux insectes. Deux stages ont été observés dans le processus des différentes formes d'humus soit « *la séparation mécanique des résidus organiques et le malaxage de ces mêmes résidus avec la fraction minérale du sol* ».

Dans les sols non cultivés, ce sont les travaux de Müller qui ont ouvert la voie à une ère biologique de la science du sol. Le terme « d'humologie » a même été mis de l'avant par Hamor [1929] plutôt que celui de « science du sol » (in Waksman [1936]). À la suite de Müller, le concept « d'horizon humique » a été développé dans différentes classifications (Ramann [1893], Henry [1908], Kubiana [1953], Wiilde [1954, 1971], Duchaufour, [1956], Delecour [1980]) parmi d'autres.

2.3. Le concept du principe humifère

Le biotope édaphique (plantes, faune et micro-organismes) a une place importante dans le concept « d'horizon humique ». Appliqué à l'agriculture, l'association de l'humus avec le concept de la vie est un aspect fondamental des théories de l'agriculture biologique. Dans son ouvrage « La fertilité du sol » (*Bodenfruchtbarkeit*) Rusch [1972] fait état d'une approche plus holistique et philosophique du concept humus dans ses théories portant sur l'agriculture biologique. D'après lui, l'humus est *un concept aussi vieux que le mondec'est le pouvoir de la fonction biologique de toutes substances de réorganiser les rebuts des êtres vivants dans une nouvelle harmonie...c'est l'expression de la relation entre la terre vivante et les autres organismes*. D'après Rusch, l'humus n'est pas uniquement un déchet qui reste (substances humiques) dans le sol suite à la décomposition de matières organiques fraîches. L'humus contient également toutes les plantes, animaux et corps microbiens qui ont été décomposés au préalable. Rusch émet l'opinion que *le concept « d'humus » s'est transformé en fonction du temps, d'un processus biologique pour n'être considéré que comme un simple résidu*. Dans sa description de l'humus en tant que substance, Rusch affirme que *l'humus forme un tissu vivant primitif où s'unissent le monde minéral et celui des substances vivantes.....avec un tissu liquide chargé d'anions et de cations . C'est la seule manière de pouvoir caractériser l'humus comme substance. On peut ainsi dire que l'humus est le tissu le plus primitif qui existe, celui sur lequel les plantes vivent*. Rusch conclut donc que *l'humus est un principe, une force originale, celle qui soutient la fertilité*.

3. La période humique (avant 1840)

3.1 Ce qui précède les travaux de Thaër

Tant en Grèce qu'à Rome, les anciens se référaient aux propriétés physiques du sol plutôt qu'aux propriétés chimiques. Il était convenu que les plantes se nourrissaient à partir de la matière organique ou de matériaux de nature analogue. Ainsi, les noyaux d'olives étaient retournés aux oliviers et les sarments à la vigne. De telles croyances se sont perpétuées tout au long du Moyen Age. Ainsi, Palissy [1580] publia sa théorie des « sels » qui est reconnue généralement par les historiens de la science du sol comme étant le principal précurseur de la théorie minérale qui sera établie plus tard par Liebig [1840]. Depuis la définition que fit Palissy de « sel » qui n'était pas strictement minérale, on peut douter de la pertinence d'une telle perception (Feller & al., [2001]). Au cours du XVII^e siècle, Van Helmont parmi d'autres, s'empara de l'idée de Palissy désignant le sol comme une simple source d'eau et de nutriments pour la croissance des plantes (Boulaine [1989])

Tout au long du XVIII^e siècle, l'humus était souvent perçu comme le sol lui-même ce qui donna plusieurs théories sur la nutrition des plantes basées sur la croyance que les plantes étaient directement redevables à l'humus pour leur nutrition carbonée. Ainsi de nombreux auteurs proposèrent une terminologie ambiguë se référant le plus souvent à « jus », à des « huiles » ou des substances « bitumineuses. (Valmont de Bomare, Pluche, Home, Duhamel du Monceau, La Salle de l'Étang, Bonnet, Rozier voir Feller & Boulaine [1987], Feller [1997 a,b]).

Tull [1733] a proposé une « *nouvelle agriculture* » où le labour est pratiqué aussi souvent que possible, car il croyait que les particules du sol étaient la source de nourriture pour les plantes. Il faut donc que la texture soit fine pour faciliter le prélèvement par les racines. D'autre part dès la fin du XVIII^e siècle, plusieurs auteurs ont rejeté ces théories comme Fabbroni [1780 in Bourde 1967] Priestley [1777], Ingen-Housz [1780 in Bourde 1967], Senebier [1782 in Bourde 1967] et de Saussure [1804]. Ils ont démontré expérimentalement la provenance du carbone gazeux durant la photosynthèse ainsi que le rôle de la lumière. Un débat est amorcé sur le sujet particulièrement entre Hassenfratz [1792a, b] et Ingen-Housz. Sans se référer à l'expérimentation, Hassenfratz a soutenu qu'une fraction de l'humus était sous la forme de carbone soluble et directement assimilable par les plantes (carbone hétérotrophe). À cette époque, plusieurs scientifiques de l'agriculture partageaient un point de vue intermédiaire en assignant à l'air et à l'humus une fonction nutritive pour les plantes. À titre d'exemple, Martin [1829] et Boussingault ([1838] d'après Grandeau 1879) accordèrent à l'humus un rôle indirect dans la nutrition carbonée celui de source de CO₂ durant la photosynthèse.

3.2 La théorie de l'humus de Thaër, l'analyse intégrée de l'aménagement de la fertilité et la perception de la durabilité

Les « *Principes rationnels de l'agriculture* » de Thaër (1809) contiennent plusieurs théories non éprouvées, portant sur la nutrition végétale. Néanmoins, ce travail a

servi de référence pour établir les bases d'une approche systématique de la fertilisation dans la définition des pratiques culturales. C'est la raison pour laquelle le travail de Thaër reçoit ici une attention particulière.

3.2.1 Les bases théoriques

Son ouvrage publié pendant la période de controverse, à savoir si le sol ou l'atmosphère était la source du carbone utilisée par les plantes. Malencontreusement, Thaër avait utilisé les postulats de Hassenfratz [1792a, 1792b] comme base théorique plutôt que les travaux de de Saussure (1804) (car il n'allait plus dans le sens de ses théories). Selon Thaër (1), la matière sèche de toute plante provient des « jus nutritifs du sol » contenus dans la fraction humique soluble à l'eau chaude; (2) l'exigence des plantes pour ces jus est sélective variant avec les espèces de plantes cultivées. Ce faisant, l'aménagement de la fertilité du sol dépend de l'équilibre humique tout comme de celle de la succession des cultures.

Même erratiques, ces énoncés théoriques jettent les bases de ce que nous considérons comme la relation sol-plante et furent pour la première fois utilisées comme un système complet d'analyse pour prédire et quantifier la fertilité.

3.2.2 Un outil d'intégration analytique de l'aménagement de la fertilité basé sur l'humus des systèmes agraires.

Les principales qualités du travail de Thaër sont entre autre, la précision de ses définitions ainsi que ses efforts pour apporter des preuves quantitatives de

certains principes rationnels agricoles, tant du point de vue bibliographique qu'expérimental. Il a créé un index analytique de fertilité allant de 0 à 100 d'après des fonctions empiriques de texture de sol (il a distingué 20 types différents), de fertilisation organique, (intensité des jachères et de la fumure) d'espèces cultivées et de rendements (Feller & al. 2001). Il fit également la simulation de son index de fertilité pour plusieurs cultures et il fut ainsi capable de les évaluer en fonction de leurs rendements soutenus (durabilité).

Un exemple nous est donné par deux systèmes agraires dont le premier a été soumis à une rotation triennale qui a causé une chute de fécondité de 17°. Thaër en conclut donc qu'un tel système ne peut maintenir le capital de fertilité du sol au-delà de la sixième année de récolte. On peut y obvier par une fumure au champ après la cinquième année. Un second assolement a augmenté la fécondité de +30.5°. Pour optimiser la valeur économique d'un tel système, Thaër suggère qu'une culture annuelle soit remplacée par une production fourragère qui maintiendra la fertilité du sol à sa valeur initiale. Ceci représente certainement le premier exemple d'un véritable souci pour maintenir des rendements soutenus, ce qui en plus dépend de bonnes pratiques organiques.

Ses analyses incluaient également un estimé de la valeur économique des méthodes agronomiques d'alors comme les types d'assolements. Ces analyses prenaient également en compte tous les coûts (travail, espace, entretien du bétail)

propres au maintien de la fertilité dans un aménagement organique basé sur l'utilisation de la jachère et de la fumure organique.

L'approche conceptuelle de la fertilité de Thaër comprend le système de relation plante-sol aussi bien que les méthodes de culture et les rotations. Il touchait ainsi à des préoccupations de l'agriculture moderne comme l'identification des indicateurs de la qualité des sols, les analyses systématiques et l'exploitation agro-économique soutenue. Le travail de Thaër a eu une influence remarquable sur la pensée de ses contemporains dans toute la première partie du XIX^e siècle. Si Thaër avait mis le cap sur les aspects minéraux plutôt qu'organiques, il aurait probablement été reconnu comme le fondateur de l'agriculture scientifique de l'ouest.

4. L'humus durant la période minéraliste (1840-1940)

Au milieu du XVIII^e, les travaux de Martin [1829] et de Boussingault [1838, cités par Grandeau, 1879], ont montré une évolution de la conception du rôle de l'humus dans la nutrition des plantes. Martin soutient que la plus grande partie du carbone des plantes provient de l'air et de l'eau. Cependant, il donne un rôle majeur à l'humus dans la nutrition carbonée en tant que précurseur du CO₂ de l'atmosphère.

4.1 La théorie de la nutrition minérale de Liebig

Liebig, de par l'autorité de « *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie* » [1840] a établi définitivement au moyen

d'expériences scientifiques, que la matière sèche des plantes était composée d'éléments minéraux. Ce sont le carbone provenant du CO₂, l'hydrogène de l'eau, l'azote et autres nutriments provenant des sels solubilisés dans le sol et l'eau. Depuis les découvertes de Liebig, la fertilisation minérale a connu un assentiment général et fourni une base moderne aux sciences de l'agriculture. Ainsi, Liebig se fait le promoteur de l'utilisation de fertilisants minéraux pour compenser la dégradation minérale des sols. C'est ainsi que son travail a permis d'établir les recommandations pour l'usage massif de fertilisants chimiques dans les systèmes de cultures.

Même les agriculteurs adoptèrent rapidement le point de vue « minéraliste » de Liebig. Quant aux aspects de durabilité de cette fertilisation, Ville [1867] fut sans le plus grand optimiste sur la viabilité de la fertilisation minérale. Pour sa part, Grandeau [1878] attira l'attention sur les assertions de Ville. En tant que partisan d'une fertilisation mixte, Il suggéra que l'humus était vital pour la croissance des plantes puisqu'il augmentait la solubilité des nutriments minéraux, donc leur disponibilité biologique aux plantes, un concept nouveau. Dans un échange de correspondance avec Grandeau, Liebig donna son appui à cette théorie. Dans le sixième volume de son important « Cours d'agriculture », Gasparin [1860] prit également une position modérée en incluant les fertilisants chimiques et organiques dans la même catégorie. Il souligne en même temps les coûts modiques des fertilisants organiques produits à la ferme. En réalité, cette référence de Gasparin aux coûts modérés des fertilisants organiques produits à la

ferme ne fait que refléter la production et la mise en marché limitée des fertilisants inorganiques avant 1880 (BOULAINÉ [1989]).

Enfinement on fit peu de démonstrations au sujet de l'absorption par la racine des plantes de composés organiques au début du XX^e siècle (Acton, [1899], Mazé [1899, 1904, 1911], Laurent [1904], Cailletet [1911], Knudson [1916], tous cités par Waksman [1938]).

4.2. Un fossé qui s'élargit entre les pratiques agricoles et le progrès des connaissances sur l'humus

Quelle que fut la force de l'influence de la théorie « minéraliste » portant sur la définition d'une « agriculture minérale » pendant la seconde Révolution agricole, les connaissances sur l'humus ne cessèrent de percer dès 1870.

4.2.1 Les cycles biogéochimiques et la minéralisation du carbone et de l'azote

Ingen-Housz [1794, 1796] fut probablement le premier à mesurer la minéralisation de la matière organique par l'émission de CO₂; il fut suivi par Boussingault et Lévy [1852, 1853]. Toutefois la plus importante étude sur la décomposition de la matière organique a été faite par Wollny [1902]. Quant à la minéralisation de l'azote, ce furent les travaux de Schloesing et Müntz [1877a 1877b], sur les eaux usées et l'utilisation du chloroforme comme agent antiseptique, qui montrèrent le rôle majeur des bactéries dans le processus de nitrification.

4.2.2 L'humus, les échanges et les propriétés de sorption du sol.

La notion de colloïde appliquée à l'humus (Berzelius, [1839, van Bemmelen, [1888] donna naissance à des études portant sur les échanges et les propriétés de la surface de la matière organique, par Gedoiz [1925] Waksman 1938, Tiulin [1926, 1927, 1938] Waksman 1938, Chernianskii [2000], Mitchell [1932], Turner [1932] Waksman 1938), Ce fut l'émergence de la notion de complexe argilo-humique de Demolon et Barbier [1927, 1929, 1933]. Dans cette perspective, le premier travail d'importance sur l'association matière organique - matière minérale est dû à Schloesing [1874] et décrit par Feller [1998], et qui fut suivi de Fickendey [1906] in Waksman 1938, Oden [1919] in Waksman 1938, Gedroiz [1925] in Waksman 1938, Tiulin [1927] Waksman 1938. Leurs travaux ont porté sur la nature du film organique à la surface des particules minérales.

4.2.3 L'humus et la formation d'agrégats

Schloesing (1874) fut l'un des premiers à s'intéresser au processus de floculation des humates.

En 1913, Dumont publia un travail insolite sous le titre « d'Agrochimie », un livrel très peu cité dans la littérature et basé entièrement sur le concept des agrégats du sol (agrégats terreux). Il y décrit en détail la formation, la composition et les propriétés de ces agrégats. Dumont distingue la partie squelettique inerte et les ciments. La composition organo-minérale à la fois de la partie squelettique et des ciments est étudiée à partir de fractions physiques et chimiques. Il distingue deux types d'humus dont les fonctions s'opposent, selon leur origine (végétale ou

microbienne). L'humus d'origine microbienne constitue « l'humus actif », qui est impliqué davantage dans les cycles agrochimiques comme celui de la nitrification. Les études portant sur l'humus, la formation des agrégats et la conservation du sol augmentèrent considérablement au cours des années 30 avec les travaux de Tiulin [1933], de Sokolovski [1933], de Bayer [1934], de Anne [1935] et de Myers [1937].

4.2.4 Autres aspects

Dans son ouvrage « *Humus origin, chemical composition and importance in nature* » Waksman [1938] a ajouté au rôle de l'humus en agriculture plusieurs autres fonctions. Parmi celles-ci, mentionnons la capacité de l'humus à stocker de l'énergie solaire, la formation et la décomposition de substances favorables ou non au biotope édaphique et certains effets curatifs, chez les humains, à partir des complexes organiques ou des micro-organismes de l'humus.

Dans sa conclusion « *Humus as an organic system* » Waksman a écrit que « *humus probably represents the most important source of Human wealth on this planet* » annonçant ainsi la réhabilitation du rôle écologique de l'humus en agriculture à tous les niveaux.

5. L'humus au centre de l'évolution de l'agriculture biologique dès 1940

5.1 La réaction contre le déséquilibre écologique de l'agriculture industrielle

Au-delà du débat sur la substitution des amendements organiques par des fertilisants chimiques, les critiques de la société, concernant les rendements

soutenus d'une agriculture intensive, ont pris naissance dans les années 1930 (Merrill [1983]). L'augmentation des rendements par l'utilisation de fertilisants chimiques fut largement reconnue dès la fin du XIX^e siècle. Toutefois, l'utilisation de fertilisants minéraux n'était qu'un seul aspect de la seconde révolution agricole. Ces derniers ne font guère plus de 15% de la totalité des nutriments exportés par les récoltes en 1900 (Boulaine [1989], Mazoyer et Roudard [1997]). Dans la première moitié du XX^e siècle, l'intensification de l'agriculture a surtout été le résultat des économies de main-d'œuvre, en particulier par rapport au machinisme. C'est l'intensification de l'érosion des sols dont les effets étaient immédiats et spectaculaires et irréversibles, qui ont attiré l'attention sur les mauvaises pratiques agricoles. Ce fut la première indication d'un recul causé par les pratiques agricoles intensives qui laissaient de vastes terrains dépourvus de la protection d'une couverture végétale. Le coût de l'érosion fut qualifié d'important par Bennett [1939] dans le Dust Bowl du mid-ouest américain et par Jacks et Whyte [1939] cité par Balfour 1944. Depuis lors, les liens entre le déclin de la fertilité des sols, la qualité de l'alimentation des hommes et leur état de santé (Merrill[1983]) ont été de plus en plus mis en évidence.

5.2. L'humus dans la philosophie de l'agriculture biologique

Le disfonctionnement biologique et l'affaiblissement des sols cultivés sans apport d'amendements organiques ont été reconnus rapidement mais sans références précises à ce sujet, puisque l'écologie des sols en était à ses débuts. Les cours de Steiner [1924] ont constitué la base de la « biodynamie » en agriculture. Ces cours font référence à des concepts holistiques et

« cosmogoniques » (l'interrelation entre les étoiles, le sol et les éléments géochimiques, les plantes, les animaux et les hommes) comme base d'une nouvelle agriculture, qui excluait tous produits chimiques. Les publications qui ont eu le plus d'influence sur l'agriculture biologique sont celles de Pfeiffer [1938], Howard [1940, 1952], Balfour [1944], Rodale [1945] et Scofield [1986]. Tous ont comme objectif d'améliorer le sol, les plantes, les animaux et la santé humaine par un aménagement biologique de la fertilité du sol. Deux aspects fondamentaux de l'agriculture biologique ont mis l'humus au cœur d'une agriculture durable à rendements soutenus.

5.2.1 Le paradigme holistique

Dans son ouvrage « The living soil » Balfour [1944] présente la quintessence de la philosophie qui est à la base de l'agriculture biologique. Les critères de Balfour reposent principalement sur une hypothèse de base qui serait le déclin de la santé de la race humaine à cause du déclin de la santé des plantes, qui dérive du déclin de la santé du sol. La philosophie de l'agriculture biologique est fondamentalement holistique. Elle perçoit toutes vies, et toutes créations comme étant inextricablement interreliées. Ainsi, ce qui est fait ou non à un membre aura un effet sur tout (Merrill [1983]). Cela est bien illustré par la pyramide d'Albrecht [1975] citée par Merrill [1983]. Cette pyramide est constituée de plusieurs strates dont le sol est la base et l'homme, le sommet. À l'intérieur de ce schéma, toute dégradation de la qualité du sol met en danger toute civilisation y compris l'humanité même, d'où la nécessité d'en assurer une saine gestion. Cette

hypothèse est bien appuyée par l'histoire et l'archéologie (Hyams [1976] in Merrill [1983], Olson [1981]).

5.2.2 La loi du retour

Un autre principe de l'agriculture biologique est la Loi du Retour. Cette loi tire son origine du « Cycle de substances vivantes », concept qui a pris naissance dans l'antiquité et qui réapparaît dans les traités d'agriculture au XVI^e et au XVII^e siècle. Ce principe a eu sans doute une influence considérable sur la « Théorie de l'humus » de Thaër à laquelle se réfèrent invariablement les tenants de l'agriculture biologique. Selon ce principe, la vie peut exister pour que des êtres vivants ou les restes de leurs activités et la décomposition de leurs êtres soient recyclés à tous les paliers de la pyramide de vie. Il faut donc assurer au sol un flux constant de substances organiques pour y maintenir la fertilité. D'après Balfour [1944], ce retour c'est l'humus, d'autant plus que Rusch [1972] traite de « théorie naïve »: l'approche de Liebig [1840]. Ainsi, Rusch devient à la fois rigoureux et idéologique dans son analyse du rôle de l'humus. Dans son ouvrage « The soil and Health » Howard [1952] partage l'approche holistique de Balfour. Il précise son interprétation en émettant l'opinion que la relation entre le sol, les plantes, les animaux et la santé humaine prend racine dans le cyclage des protéines entre les êtres vivants. Même si les opinions de Howard (1940, 1952) sont partiellement idéologiques, cela ne l'a pas empêché de publier plusieurs traités techniques rigoureux sur la production de compost, qu'il qualifia de « compost usiné ».

6. Réconcilier les théories avec la pratique : un humus agro-environnemental versatile depuis 1940.

Grâce aux progrès des connaissances scientifiques, l'humus a suscité un regain d'intérêt depuis 1940, en partie à cause des tenants de l'agriculture biologique et le désir de la société en général en faveur d'une agriculture durable et des rendements soutenus.

6.1. Pour une perception intégrée du sol

Malgré l'approche holistique voulant que le sol soit un organisme vivant comme le soutiennent les tenants de l'agriculture biologique, l'écologie a contribué par la formulation de concepts majeurs à l'étude scientifique des humus au cours des 60 dernières années. Darwin [1883, 1884] in Feller, [2000] et Waksman [1938] dans son ouvrage « Humus as an organic system » doivent être reconnus comme les précurseurs de l'écologie du sol. Le passage de la notion d'écosystème du paysage à celui du sol, a été déterminant dans la naissance et l'établissement de l'écologie édaphique qui, selon Tansley [1935], Andre & al. [1994], est le dernier retranchement des sciences agronomiques.

Par la notion d'écologie du sol, l'humus a retrouvé son rôle central en tant qu'interface entre le monde minéral, la faune et les composantes d'origine végétale. Nous reconnaissons maintenant plusieurs rôles fondamentaux à l'humus dont celui touchant directement la croissance des plantes et indirectement celui de source de nutriments et d'énergie pour l'ensemble du

biotope édaphique qui assure un contrôle serré de la nutrition des plantes. (Myers & al. [1994], Neher, [1999]).

Les deux dernières décennies ont largement souligné l'aptitude des écosystèmes d'échapper aux contraintes abiotiques environnementales par leur organisation interne même en produisant des systèmes ou produits tampons ou en modifiant les facteurs abiotiques (Perry et al.[1989]. Pour les écosystèmes, terrestres l'humus est reconnu comme le principal tampon tant en ce qui regarde le climat que les autres contraintes propres au sol. Il établit un lien étroit entre les plantes et le sol dans une perspective de réhabilitation de l'écosystème (Perry et al. [1989], Aronson & Le Floc'h [1996]). Toutefois, une contradiction apparaît lorsqu'on considère l'humus comme source de nutriments nécessitant la décomposition de l'humus et son rôle structural dans l'amélioration des propriétés physiques et chimiques unique dans la stabilisation des interactions plantes-sol soulignée par Ridder & van Keulen [1990]. De fait, des applications récentes des théories de la thermodynamique hors équilibre, comme les systèmes édaphiques, semblent pouvoir résoudre en partie cette contradiction (Straskraba et al. [1999]). Ces auteurs pensent que la structure du sol et son organisation sont sous un contrôle biologique à forte dépendance énergétique régulé par le flux du carbone et sa dissipation. Cela implique *de facto* le cyclage de la matière organique (Perry [1989]). Il est probable qu'une percée dans la connaissance de l'humus portera probablement à la fois sur la notion statique de pool de nutriments et une nouvelle approche de la connaissance de l'humus, portant sur la dynamique des flux (les modèles de chaînes trophiques, la

quantification des émissions gazeuses de carbone). Cela est tout à fait pertinent avec la définition de la fertilité de Balfour; «*the capacity of soil to receive, store and transmit energy* » (Balfour [1976] in Merrill[1983]).

Des travaux de terrain en agro-écologie tropicale nous obligent à réévaluer le rôle de l'humus dans la production végétale (Woomer et al. [1994]) Il est maintenant reconnu que la fertilisation minérale en sols tropicaux, sans apports organiques, est insoutenable écologiquement (Mokwunye & Hammond [1992]). D'autre part, le contrôle biologique de la fertilité par rapport aux facteurs abiotiques est plus difficile dans les régions équatoriales, même si la qualité des humus en climats tropicaux et tempérés ne diffère guère. C'est le taux de décomposition de la matière organique qu'il faut regarder (Jenkinson & Ayanaba [1977], Greenland & al. [1992]).

6.2. En réponse à la société qui réclame des pratiques agricoles durables avec des rendements soutenus.

Le renouveau d'intérêt pour l'étude de l'humus après la seconde Grande Guerre n'est pas né de l'unique intérêt scientifique. Les coûts de production et de transport de fertilisants minéraux ont été évalués et critiquée par Pimentel [1973] au début de la crise pétrolière. Pimentel et d'autres auteurs comme Hall [1993] et Izac [1997] firent une critique objective des coûts véritables d'une telle pratique en agriculture moderne. Les demandes de la société pour des pratiques agricoles basées sur des rendements soutenus, moins gourmandes en nutriments et en combustibles fossiles, se sont manifestées. Elles le furent dans l'optique de

pouvoir assurer le maintien des qualités agricoles et environnementales de l'agriculture. Ces pratiques devaient être à la fois de bonnes pratiques écologiques dans un système économique qui peut s'appliquer à toute la planète. Cette demande de la société a conduit à une réévaluation de la pertinence de nos pratiques organiques en agriculture (Izac & Swift [1994]) et par la réinsertion de cycles organiques par une régie de l'humus dans les pratiques agricoles (Gardner [1998]).

6.3. Un appui social à une « agriculture écologique »

L'ardent défenseur de l'agriculture biologique qu'a été Howard [1952], fut très critique sur « l'intrusion de la science » en agriculture. Une méfiance réciproque se développa entre les tenants de l'agriculture biologique et les hommes de science jusque dans les années 80. Cette méfiance avait pour origine le refus de chacun de bien définir ce qu'est une agriculture biologique comme pratique agricole alternative (Merrill, [1983]). Néanmoins, l'écart qui séparait les hommes de science des agriculteurs s'est atténué en parti grâce à l'évolution des politiques agricoles des États depuis les années 50 dans le domaine de l'agriculture biologique. Cela a contribué à l'apparition d'autres pratiques de régie de l'humus en définissant de nouveaux modes culturaux.

À titre d'exemple, en Europe des stations de recherche sur l'agriculture biologique sont apparues dès 1939 (Haughley Trust en Angleterre par Balfour), en Allemagne en 1950 puis en Suisse et en Hollande au milieu des années 70. Ces stations ont été fondées par le secteur privé, mais le sont maintenant partiellement par les

États (Krell [1997]). À un niveau plus élevé, nous assistons à la formation en 1992 de l'IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements) qui a tenu sa première conférence internationale dès 1977. Dès 1996, 400 exposés avaient déjà été présentés. Une pénétration de plus en plus profonde de l'agroforesterie dans le monde ainsi que le compostage et le paillage (mulching) tout comme le semi direct, témoignèrent de la valeur scientifique de la régie intégrée de l'humus d'une agriculture à rendements soutenus. Il est remarquable de noter que ces pratiques étaient généralement fort répandues avant la « période minéraliste » mais qu'elles n'avaient subsisté que chez les petits agriculteurs.

7. L'humus et les changements climatiques globaux

Dans le contexte des changements climatiques globaux induits par l'activité humaine, provoqués par les gaz à effet de serre, les transferts de carbone sont depuis l'objet d'une attention croissante (Schlesinger et al. [2000]). Le carbone contenu dans les sols est trois fois supérieur au contenu en CO₂ de l'atmosphère (IPCC¹ [2000]). Tout changement des contenus en CO₂ du sol par les activités humaines comme le passage des cultures aux pâturages ou à des pratiques forestières abusives, aura un impact considérable sur la concentration en carbone de l'atmosphère. La gestion de ce carbone est à travers l'activité de l'humus. On voit ici la raison pour laquelle il y a de si nombreuses études sur l'oxydation du carbone du sol. Il y a également de nombreux travaux qui portent sur la relation qui existe entre la fixation de l'azote, le type d'utilisation du sol et les changements climatiques au niveau local, mais dans une optique d'évaluation

globale (Schlesinger & al. [2000]. De nouveaux modes de cultures seront proposés dans le but d'augmenter la capacité du sol à retenir et isoler le carbone. Il faut cependant noter que les études publiées à ce sujet manquent généralement de précision, ce qui illustre notre méconnaissance de la capacité de l'humus portant, cette fonction de rétention du carbone.

8. Conclusion

Avant 1840, le rôle de l'humus dans la nutrition végétale était controversé. Les théories publiées par les tenants de l'humus, se réclamant de l'assimilation matérielle de l'humus par la racine des plantes, n'avaient pas été prouvées et ces assertions étaient reléguées au niveau du mythe. À cette époque, les pratiques agricoles ignoraient les théories scientifiques. Après cette période, durant la période minéraliste, la régie de l'humus fut exclue des théories officielles portant sur la fertilité des sols, donc des méthodes intensives de production.

Depuis 1940, des signes évidents sont apparus concernant le déclin de la qualité du sol. Des progrès scientifiques en écologie agricole, suscités en partie par les approches de la philosophie holistique de l'agriculture biologique, amenèrent à comprendre l'humus comme une ressource plus ou moins renouvelable. Les problèmes économiques et environnementaux de l'agriculture confèrent une place importante à l'humus dans les pratiques visant des rendements soutenus et une agriculture durable. Au cours des dernières décennies, la théorie humique de Thaër a été partiellement réhabilitée. Il avait raison de dire que la croissance des

¹ International Panel on Climate Change

plantes reposait sur la consommation de l'humus. Son erreur fut de croire que l'humus était utilisé directement par les plantes (l'hypothèse hétérotrophe). Les progrès dans l'écologie des sols montrèrent que l'humus avait un rôle essentiel à jouer par sa position cruciale dans les cycles biogéochimiques et le contrôle du métabolisme tant microbien que celui de la pédofaune.

L'histoire du concept humique, lié à la fertilité et aux rendements soutenus, illustre une fois de plus combien il est gratifiant pour la science de quitter le réductionnisme pour une approche ouverte et holistique. De plus, cette réhabilitation a fait passer ce concept de local qu'il était, à l'échelle régionale et finalement à celle du monde.

Remerciements

Les auteurs remercient de l'aide bibliographique apportée par M. Merrill.

BIBLIOGRAPHIE

Acton, E.H. (1889) «**The assimilation of carbon by green plants from certain organic compound**» **Proc. Roy. Soc. Londres 47 :150-175**

Albrecht, W.A. (1975) «**The Albrecht Papers**» **ACRES USA, Raytown**

Andre, H.M., Noti, M.I. & Lebrun, P. (1994) «**The soil fauna : the other last biotic frontier**» **Biodiversity and Conservation 3: 45 56.**

Anne, P. (1935) «**Les fumures organiques, l'état calcique de la dispersion de l'argile dans les limons**» **Ann. Agron, 5;781-785**

Aronson, J. & Le Floch, E. (1996) «**Vital attributes of ecosystems and landscapes: missing tools for restoration ecology**», **Restoration Ecology 4: 377-387.**

Balfour, E.B. (1944) «**The living soil**» **Faber & Faber, éditeurs, Londres.**

Balfour, E.B. (1976) «**The living soil and the Haughley Experiment**» **Faber & Faber, éditeurs, Londres**

Baver, J.D. [1934] «**The aggregation of desert soils**», **Bull. Amer. Soil Survey Assn. 16: 44-45, 54.56.**

Bennett, H.H. (1939) «**Soil Conservation**» **McGraw Hill, New York –Londres, éditeurs.**

Berzelius, J.J. (1839) «**Lehrbuch der Chimie**» **traduction en langue allemande du suédois par Wöhler, vol 8 p. 11-6 et 341-384.**

Boulaine, (1989) «**Histoire des pédologues et de la science des sols**» **les éditions de l'INRA, Paris.**

Bourde, A. (1967) «**Agronomie et agronomes en France au XVIII^e siècle**» SEVPEN éditeur, **Paris.**

Boussingault, J.B. & Lévy (1852) «**Sur la composition de l'air confiné dans la terre végétale**» **Comptes Rendus Acad. Sci. 35: 765**

Boussingault, J.B. & Lévy (1853) «**Sur la composition de l'air confiné dans la terre végétale**» **Ann. Chim. Phys. 37: 5-50**

Cailletet, L. (1911) «**Sur l'origine du carbone assimilé par les plantes**» **Comptes Rendus Acad. Sci 152: 1215-1217**

Chernyanskii, S.S. (2000) «**Scientific heritage of A.F. Tyulin (1885-1955) and the development of his concept of the soil absorption complex**» **Eurasian Soil Science 8; 1029-1036**

Darwin, C. (1837) «**On the formation of mould**» **Trans. Geol. Soc. London, 5 : 505**

Darwin, C. (1881) «**The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits** » première édition, J. Murray, Londres

De Bomare, V. (1768) «**Dictionnaire raisonné. universel d'histoire naturelle** » Paris

De Ridder, N. & van Keulen, H. (1990) «**Some aspects of the role of organic matter in sustainable intensified arable farming systems in the West-African semi-arid-tropics (SAT)**» **Fertilizer Research 26: 299-310**

De Saussure , T. (1804) «**Recherches chimiques sur la végétation**» Nyon éditeur **(Gauthier–Villars Paris 1957)**

Delecour, F. (1980) «**Essai de classification pratique des humus**» **Pédologie 30: 225-241**

Demolon, A. & Barbier, G. (1927) «**Conditions de formation et constitution du complexe argilo-humique des sols** » **Ann. Sci, Agron. 43: 341-373**

Demolon, A. & Barbier, G. (1929) «**Conditions de formation et constitution du complexe argilo-humique des sols** » **Comptes Rendus Acad. Sci. 188: 654-656**

Demolon, A. & Barbier, G. (1933) «**Conditions de formation et constitution du complexe argilo-humique des sols** » **Ann. Agron. 3 : 73-82**

Diderot, D. & d'Alembert (1765) « **Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers** » Briasson, David l'Ainé, Le Breton, Durand, libraires, **Paris.**

Duchaufour, P. (1956) «**PÉDOLOGIE; applications forestières et agricoles** » **École Nationale des Eaux et Forêts, Nancy.**

Dumont, J. (1913) «**Agrochimie**» **Libr. Sc. Agric. Aamt édieur, Paris**

Ebermeyer, E. (1876) «**Die gesammte Lehre des Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues, unter Zugrundlegung der in den koenigl » Staatsforsten Bayerns angestellten Untersuchungen, Berlin**

Emeis , C. (1875) «**Waldbauliche Forschungen un Betrachtungen** » **Berlin**

Fabroni (1780) «**Réflexions sur l'état actuel de l'agriculture ou exposition du véritable plan pour cultiver ses terres avec le plus grand avantage et pour se procurer des engrais**» **Paris**

Feller, C. & Boulaine J. (1987) «**La réapparition du mot humus au XVII^e siècle et sa signification agronomique** » **Rev. Forest. Franç. 29: 487-495**

- Feller, C. (1997a) «**The concept of soil humus in the past three centuries** » in Yaalon, D.H., Berkowicz, S. éditeurs –**History of Soil Science, Advances in Geoecology**. 29 :**15-46** Catena Verlag Reiskirschen
- Feller, C. (1997b) «**La matière organique des sols: aspects historiques et état des conceptions actuelles**» **Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France** 83: **85-98**
- Feller, C. (1998) «**Un fractionnement granulométrique de la matière organique des sols en 1874** » **Étude et Gestion des sols** 5: **195-200**
- Feller, C, Brown, G.G. & Blanchart, E. (2000) «**Darwin et le biofonctionnement des sols**» **Étude et Gestion des sols** 7: **395-402**
- Feller, C., Boulaine, J. & Pedeo, G. (2001) «**Indicateurs de fertilité et durabilité des systèmes de culture au début du XIX^e siècle : l'approche de Albrecht-Thaër (1752-1828)** » **Étude et Gestion des sols** 5
- Fickendey, E. (1906) «**Notiz über Schutzwirkung von Kolloiden auf Tonsuspensionen und natürlich Tonboden**» **Journ. Land.** 54
- Gardner, G. (1998) «**Recycling organic wastes** » : in **State of the World, World Watch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society** » Norton New York, pp **96-112**
- Gasparin (1860) «**Cours d'Agriculture** » Maison Rustique, édits.
- Gerdroiz, K.K. (1925) «**The soil absorbing complex and the absorbed cations of the soil as a basis for a genetic soil classification**» **Nosov. Agr. Exp.. Bull.** 38

Grandeau, L. (1878) «**Recherches expérimentales sur le rôle des matières organiques du sol dans la nutrition des plantes**» **Annale de la Station Agronomique de l'Est Berger-Levrault et Cie, édit. Nancy 225-352**

Grandeau, L. (1879) «**Chimie et physiologie appliquée à l'agriculture et à la sylviculture, 1:La nutrition de la plante** » **Berger-Levrault et Cie, édit. Paris.**

Greenland, D.J., Wild, A. & Adams, D (1992) « **Organic matter dynamics in soils of the tropics – from myth to complex reality** » in Lal, R. & Sanchez P.A. (édits) **Myth and Science of Soils of the Tropics. Soil Science Society of America, Madison, 17-33**

Hall, C.A.S. & Hall, M.P.H. (1993) «**The efficiency of land and energy use in tropical economies and agriculture** » **Agriculture Ecosystems & Environment 46: 1-30**

Hassenfratz, J.U. (1792a) «**Sur la nutrition des végétaux** » **Annales de Chimie 13: 1787-192 et 318-380**

Hassenfratz, J.U. (1792b) «**Sur la nutrition des végétaux** » **Annales de Chimie 14: 55-64**

Henry, E. (1908) «**Les sols forestiers** » **Berger-Levrault édit. Paris-Nancy**

Howard, A. (1940) «**An agricultural testament** » **Oxford University Press, Oxford**

Howard, A. (1952) «**The soil and health; A study of organic agriculture** » **2^e édition Devin-Adam Co. New York**

Hundeshagen, J.C. (1830) « **Die Bodenkunde in Land-und Forstwirtschaftlicher Beziehung** » **Tübingen**

Hyams, E. (1976) «**Soil and Civilization** » **New York**

Ingen-Housz J. (1780) «**Expériences sur les végétaux** » **Paris**

Ingen-Housz J. (1794) «**Essai sur la nourriture des plantes et la rénovation des sols** »
Journ. Phys. Chem. Hist. Nat. Arts 2;460

Ingen-Housz J. (1796) «**Essay on the food of plants and the renovation of the soil** »**Bd.**
Agricult. Rept. Londres

Intergovernmental Panel on Climate Change (2000) **Washington**

Izac, A,-M.N. & Swift, M.J. (1994) «**On agricultural sustainability and its measurement in small-scale farming in sub-Saharan Africa** » **Ecological Economics 11 :105-125**

Izac, A,-M.N. (1997) «**Ecological economics of investing in natural resource capital in Africa.** » in **Replenishing Soil Fertility in Africa. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America,, Madison USA 237-251**

Jacks, G.V. & Whyte, R.O. (1939) « **The Rape of the Earth: a World Survey of Soil Erosion** »
Faber and Faber, Londres.

Jenkinson, D.S. & Ayanaba, A. (1977) «**Decomposition of ¹⁴C labelled plant material under tropical conditions** » **Soil Science Society of America Journ. 41 : 912-915.**

Knudson, L. (1916) « **Influence of certains carbohydrates on green plants** » **Cornell Univ. Agr.Exp. Sta. Mem # 9.**

Krell, R. [éditeur] (1997) «**Biological farming research in Europe** » **Proceedings of an Expert Roundtable held in Braunschweig 28/06/97 REU Technical Serries n° 54**
FAO Rome.

Kubiana, W.L. (1953) « **Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas** » F. Enke
Verlag, Stuttgart.

Laurent, J. (1904) «**Recherches sur la nutrition carbonée des plantes vertes à l'aide de
matières organiques** » Rev. Gén, Bot. 16 : 14-48, 68-80, 96-119, 120-128, 155-
166, 188-202, 231-241.

Liebig, J. (1840) « **Die Organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und
Physiologie** » Vieweg, Braunschweig.

Martin, A.E. (1829) «**Traité théorique et pratique des amendements et des engrais** »
Rousselon Libr.édit. Paris.

Martin, F. (1941) «**Les mots latins** » Hachette, Paris

Mazé, P. (1899) «**L'assimilation des hydrates de carbone et l'élaboration de l'azote
organique dans les végétaux supérieurs** » Comptes Rendus Acad. Sci. 128 :
185-187.

Mazé, P. (1904) «**L'assimilation des hydrates de carbone et l'élaboration de l'azote
organique dans les végétaux supérieurs** » Ann. Inst. Pasteur 18 : **721-747**

Mazé, P. (1911) «**L'assimilation des hydrates de carbone et l'élaboration de l'azote
organique dans les végétaux supérieurs** » Comptes Rendus Acad. Sci. 152;
783-785.

Mazoyer, M. & Roudard, L. (1997) «**Histoire des Agricultures du Monde; du Néolithique à la
Crise Contemporaine** » ditions du Seuil, Paris

- Merrill, M.C. (1983) «**Eco-agriculture : a review of its history and philosophy » *Biological Agriculture & Horticulture* 1: 181-210.**
- Mitchell, J. (1932) «**The origin, nature and importance of soil organic constituents having base exchange properties » *Journ. of the American Society for Agronomy* 24 : 256-274.**
- Mokwunye, U. & Hammond, L.L. (1992) «**Myths and science of fertilizer use in the tropics » in Lal, R & Sanchez, P.A. (éditeurs) *Myths and Science of Soils of the Tropics. Soil Science Society of America, Madison, 121-134,***
- Müller, P.E. (1879) «**Studier over Skovjord, some Bidrag til Skovdyrkningens Teori; Om Bøgemuld og Bøgemor paa Sand og Ler » *Tidsskrift for Skovbrug*,t.3.1**
- Müller, P.E. (1884) « **Studier over Skovjord, some Bidrag til Skovdyrkningens Teori : Om Muld og Mor i Egeskove og paa Heder » *Tidsskrift for Skovbrug* t.7.1**
- Müller, P.E. (1889) «**Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur la végétation et le sol » *Berger-Levrault et Cie Paris-Nancy.***
- Myers, H.E. (1937) «**Physiochemical reactions between organic and inorganic soil colloids as related to aggregate formation » *Soil Science* 44 : 331-359.**
- Myers, R.J.K., Palm, C.A. Cuevas, E. Gunatilleke, I.U.N. & Brossard, M. (1994) « **The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand » in Wooster, P.L. & Swift, M.J. (éditeurs) –*The Biological Management of Tropical Soil Fertility. Wiley-Sayce Publication* : 81-116**

Neher, D.A. (1999) «**Soil community composition and ecosystem processes – Comparing agricultural ecosystems with natural ecosystemss** » **Agroforestry Systems** 45: **159-185,**

Oden, S. (1919) « **Die Huminsäuren** » **Kolloidchemie Beihefte** 11 : **75-260.**

Olson, G.W. (1981) «**Archeology : lessons on future soil use** » **Jour, Soil Wat. Cons.** 261 : **261-264**

Palissy, B. (1880) « **Œuvres complètes** » **P. Chavaravay, édit. Paris.**

Patrin (1803) «**Humus, terre végétale ou terreau** » in **Nouveau Dictionnaire d'histoire naturelle appliquée aux arts, principalement à l'agriculture et à l'économie rurale et domestique.** vol. 11 **Crapelet, édit. Paris 445-447.**

Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989) «**Bootstrapping in ecosystems** » **Bioscience** 39 : **230-237.**

Pfeiffer, E.E. « **Die Fruchtbarkeit der Erde, ihre Erhaltung und Emeuerung; Das Biologisch-Dynamische Prinzip in der Natur** » **Zbinden und Hügin, Bâle.**

Pimentel, D. (1973) «**Food production and energy crisis** » **Science** 182 : **443-449.**

Priestley, D. (1777) «**Expérience et observations sur différentes espèces d'air** » **traduit de l'anglais par Gibbelin, Noyon édit. Paris.**

Ramann, E. (1893) «**Forstliche Bodenkunde und Standortslehre** » **Berlin.**

Rodale (1945) «**Pay Dirt** » **Rodale Press Emmaus USA**

Rozier, L.A. (1781-1805) «**Cours complet d'agriculture théorique, pratique, économique et de médecine rurale et vétérinaire** » Paris.

Rusch, H.P. (1972) «**La fécondité du sol** » traduit de l'allemand par C. Aubert. Le Courrier du Livre édit. Paris. (« **Bodenfruchtbarkeit** » [1968] K. F. Haug Verlag).

Schlesinger, W.H., Palmer-Winkler, J. & Megeonigal, J.P. (2000) «**Soils and the global carbon cycle** » in Wigley, T.M.L., Schimel, D.S. éditeurs –The Carbon Cycle, Cambridge University Press pp 93-101.

Schloesing, T, (1874) «**Étude sur la terre végétale** » Ann. Chim. Phys. 5^e série 2 : 514-546.

Schloesing, T. & Müntz, A. (1877a) « **Sur la nitrification par les ferments organisés** » Comptes Rendus de l'Académie 84 : 301-303,

Schloesing, T. & Müntz, A. (1877b) « **Sur la nitrification par les ferments organisés** » Comptes Rendus de l'Académie 85 : 1018-1020,

Scofield, A.M. (1986) «**Organic farming : the origin of the name** » Biological Agriculture & Horticulture 4 : 1-5.

Senebier (1782) « **Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire pour modifier les êtres des trois règnes de la nature et surtout ceux du règne végétal** » vol. 3.

Sokolovski, A.N. (1933) « **The problem of soil structure** » in Trans. 1st Comm. Int. Soc. Soil Sci. Soviet Sect. Vo. 1 : 34-110

Steiner, R, (1924) «**Agriculture. A course of eight lectures** » Biodynamic Agriculture Association Londres.

Straskraba, M., Jorgensen, S.E. & Patten, B.C. (1999) «**Ecosystems emerging : 2. Dissipation » Ecological Modelling 117 : 3-39.**

Syers, J.K. & Carswell, E.T. (1995) « **Role of soil organic matter in sustainable agricultural systems » in Lefroy, R.D.B., Blair, G.J. & Carswell, E.T. éditeurs -Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture Ubon Thaïlande 24-26/8/1994 7-14.**

Tansley, A. (1935) «**The use and abuse of vegetational concepts and terms » Ecology : 16 : 284-307.**

Thaër, A. (1809) «**Grundsätze der rationellen Landwirtschaft » Realschulbuch éditeurs, Berlin**

Thaër, A. (1811) «**Principes raisonnés d'agriculture » traduit de l'allemand par E.F.B. Crud, J.J. Perchoud édit Paris.**

Tiessen, H., Cuevas, E. & Chacon, P. (1994) «**The role of soil organic matter in sustaining soil fertility » Nature 371 : 783-785.**

Tiulin, A.T. (1926) «**Decomposition of oranic matter and changes in nitrification and absorption power of soils » Tr. Naucchn Inst. Udobr 33 :40-71.**

Tiulin, A.T. (1927) «**Some views on the composition of the absorbing soil complex » Agr. Exp. Sta. Perm. 1 : 1-28**

Tiulin, A.T. (1933) «**Some considerations on the genesis of soil structure and on methods for its determination. » in Trans, 1st Comm. Int. Soc. Soil Sci. Soviet sec. A vol 1, 111-132.**

Tiulin, A.T. (1938) «**Some views on the composition of the absorbing soil complex** » **Soil Science** 45 : 343-358,

Tull, J. (1733) « **Horse-hoeing husbandry or an essay on the principles of tillage and vegetation** » **Londres**

Turner, P.E. (1932) «**An analysis of factors contribution to the determination of saturation capacity in some tropical soil types** » **Journ. of Agri, Sci.** 22 : 72-91.

Van Bemmelen, J.M. (1888) « **Die Absorptionsverbindungen und das Absorptionsvermögen der Ackererde** » **Landw, Vers. Sta.** 35 : 69-136

Ville, G. (1867) « **Les engrais chimiques** » **Entretiens agricoles Librairie Agricole, Paris**

Virey (1803) «**Aliments** » in **Nouveau dictionnaire d'histoire naturelle appliquée aux arts, principalement à l'agriculture et à l'économie rurale et domestique** » vol. 11 **Carpelet éditeur, Paris pp. 555-572**

Waksman, S. A. (1938) « **Humus, Origin, chemical composition and importance in nature** » 2^e édition révisée **Williams and Wilkins Co. Baltimore, London.**

Wallerius, J.G. (1753) «**Minéralogie ou description générale des substances du règne animal** » vol. 1 **Durand et Pissot, éditeurs, Paris.**

Wilde, S.A. (1954) «**Forest humus; its genetic classification** » **Proc. Wisc. Acad. of Sci. Arts and Lett.** 43 : 137-163.

Wilde S.A. (1971) «**Forest humus; its classification on a genetic basis** » **Soil Science** 111 : 1-12.

Wollny, E. (1902) « **La décomposition des matières organiques et les formes d'humus dans leurs rapports avec l'agriculture** » Berger-Levrault éditeurs. Paris-Nancy

Woomer, P.L., Martin, A., Albrecht, A. Resck, D.V.S & Schaarpenseel, H.W. (1994) **The importance and managerment of soil organic matter in the tropics** » in **Woomer. P.L. & Swift. M. J. (éditeurs) The biological Management of Tropical Soil Fertility. John Wiley & Sons, Chichester : 47-80.**

WRI² (2000) «**World Resources 2000-2001, People and Ecosystems : The Fraying Web of Life** » Washington.

oo

Publication n° 146
novembre 2001

Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux
UNIVERSITÉ LAVAL
Département des Sciences du Bois et de la Forêt
Québec G1K 7P4
QUÉBEC Canada

Courriel : gilles.lemieux@sbf.ulaval.ca
<http://www.sbf.ulaval.ca/brf/>
FAX 418-656-5262
tel. 418-656-2131 poste 2837
ISBN : 2-921728-64-8

² Would Resource Institute