

# Sol, humus et nutrition des plantes

De la chimie agricole à l'agrogéochimie  
(du 18<sup>e</sup> au 20<sup>e</sup> siècle)

Georges Pédro

## Introduction

Je souhaiterais dire en préambule de cette communication que celle-ci ne doit pas être considérée à proprement parler comme une note à caractère historique, qui devrait reposer sur le décryptage de nombreux textes de base. Il s'agit simplement de brosser une large fresque tendant à mettre en perspective les différentes étapes qui ont marqué le développement des connaissances scientifiques dans le domaine de l'alimentation des végétaux, et notamment de la nutrition des plantes cultivées ; ce dernier domaine étant considéré lui-même comme un sous-ensemble du fonctionnement chimique de la biosphère tout entière.

Au cours du temps – comme nous le verrons – les choses se sont mises en place d'une manière très progressive et de façon non linéaire. À certains moments, le foisonnement des résultats et des idées a pris même les caractères d'un véritable chassé-croisé. En conséquence, l'exposé ci-après essaiera avant tout de faire ressortir l'enchaînement des découvertes, tel qu'il peut être envisagé aujourd'hui en prenant

un certain recul. Par ailleurs, il est bon d'ajouter que l'approche proposée ici sera souvent de type binaire, donc quelquefois un tant soit peu simplificatrice.

## Place et rôle de la nutrition des plantes dans la production agricole

Aborder un tel problème revient en fait à tenter de répondre à trois questions.

Première question : comment obtenir une production optimum des végétaux que l'homme a choisi de cultiver, qu'il s'agisse de plantes alimentaires, textiles, tinctoriales, etc. ?

À cet effet, on sait aujourd'hui qu'on peut intervenir globalement à deux niveaux : (a) d'une part, en assurant l'expression maximum du potentiel génétique de la plante à cultiver ; (b) d'autre part, en promouvant une amélioration de ce potentiel génétique.

Nous n'envisagerons pas ici ce second point qui ne fait pas partie du sujet, bien qu'il soit à notre époque tout à fait capital (50 % des performances viennent en effet de là). Par ailleurs, il n'a démarré – malgré tout ce qui a été réalisé en France par les Vilmorin – qu'à la suite des travaux de Mendel, travaux qui ont été réellement redécouverts après 1900 et dont le développement caractérise surtout le 20<sup>e</sup> siècle (cf. Feyt, p. 215).

Deuxième question : comment obtenir une production optimum des variétés retenues par l'agriculteur ?

Cela implique de faire en sorte que l'on se préoccupe de deux éléments, à savoir (a) tout d'abord, d'assurer une bonne alimentation des plantes au cours de la culture, (b) en second lieu, d'atteindre une protection maximum contre les attaques parasitaires et ce, à la fois pendant le cycle cultural et après la récolte.

Il ne sera pas question ici de la deuxième condition qui n'entre pas à proprement parler dans le thème abordé ; indiquons cependant que

la compréhension scientifique de la protection des plantes n'a démarré que très tard, et cela permet de faire un clin d'œil à Duhamel du Monceau (1700-1782), le grand agronome français du 18<sup>e</sup> siècle qui est le premier à avoir montré en 1727, à propos de la maladie du safran qui sévissait dans l'Orléanais, que cette maladie était d'origine parasitaire. Aujourd'hui, par la vision générale que Duhamel du Monceau a eue des problèmes parasitaires des peuplements végétaux, on peut dire qu'il a été le fondateur non seulement de la phytopathologie, mais aussi de l'épidémiologie.

Troisième et dernière question : comment assurer une bonne nutrition des plantes cultivées ?

C'est ce qui constitue le sujet essentiel de notre présentation.

Il y a eu avant 1780, schématiquement, deux écoles :

1) celle qui mettait l'accent sur la préparation de la terre mise en culture, notamment grâce aux travaux aratoires, ceux-ci améliorant l'alimentation en favorisant l'aération de la terre cultivée, ainsi que les contacts entre le sol et la plante par l'intermédiaire des racines. C'est la théorie de l'anglais Jethro Tull (1733) reprise en France par Duhamel du Monceau (1750-1756) et dont la formule condensée est : « un bon labour vaut mieux qu'un apport de fumier » ;

2) la deuxième école insistait sur l'impérieuse nécessité de procéder à une restitution d'aliments au sol, notamment par un apport extérieur et en particulier du fumier de ferme dont les effets bénéfiques étaient connus depuis l'Antiquité, ce qui s'est traduit ultérieurement sous la forme lapidaire : « le fumier est le seul engrais valable ».

En raccourci, on peut dire que la première théorie s'avère insuffisante, car elle ne prend en compte que le court terme ; elle ne se préoccupait pas en effet du niveau des stocks d'éléments nutritifs présents dans la terre mise en culture, mais s'intéressait uniquement à la meilleure façon de libérer ceux-ci afin de les mettre à la disposition de la graine, puis de la plante. La seconde en revanche, qui prenait en compte dans le même temps le court terme et le long terme, reposait sur une conception beaucoup plus générale de l'alimentation des plantes faisant intervenir à la fois les stocks et les flux d'éléments nutritifs, donc en promouvant une approche essentiellement chimique. Encore fallait-il que la chimie, en tant que science, soit suffisamment développée ; et c'est ce chemin commun à la chimie et à la nutrition des plantes que nous allons essayer de

parcourir dans la suite de cet exposé. Nous distinguerons à cet effet deux grandes étapes :

- de la naissance à l’apogée de la chimie agricole ;
- de la chimie agricole à la biogéochimie et à l’agrogéochimie.

## ■ Naissance et apogée de la chimie agricole

La réalisation de cette étape implique de mettre l’accent sur plusieurs aspects, parmi lesquels l’émergence de la chimie moderne et l’application et le développement de la chimie de la nutrition des plantes

### *Mise en place de la chimie moderne*

Le postulat de départ de cette approche est que la plante a besoin de substances nutritives pour assurer sa croissance. D’où ces aliments peuvent-ils venir à la surface de notre planète et quels sont-ils ? En observant la nature, on a été amené à constater qu’ils pouvaient provenir soit de l’air, soit de l’eau, soit de la terre végétale.

Or quelle est la constitution de l’air, de l’eau, de la terre végétale et aussi des végétaux, une fois reconnu qu’il s’agit de constituants respectivement gazeux, liquides ou solides ? Cela a été le problème majeur du 18<sup>e</sup> siècle qui repose en fait d’une part sur la découverte de l’existence d’éléments chimiques, ce qui était absolument une condition nécessaire, mais non suffisante et d’autre part, sur la mise en place d’un système général d’interprétation de la chimie, coordonnant le tout. Et là il a fallu attendre l’œuvre de Lavoisier dans les années 1780 (*Traité élémentaire de chimie*, 1789).

La découverte des éléments chimiques a été une quête longue et assez confuse ; on s’en rend très bien compte au cours de ses diffé-

rentes étapes et à travers les dénominations proposées : air vital, air inflammable, air fixe... L'air vital est en fait l'oxygène découvert par Priestley (1774), mais que celui-ci incorporait à une théorie sans issue, qui était encore la théorie du phlogistique. L'air inflammable est l'hydrogène découvert par Cavendish (1766), tandis que l'air fixe, découvert par Black (1803), est déjà une combinaison, puisqu'il s'agit du gaz carbonique  $\text{CO}_2$ .

Par ailleurs, il a fallu du temps pour montrer que l'eau n'était pas un élément, mais une véritable combinaison à base d'oxygène et d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}$ ), que l'air était avant tout un mélange composé d'oxygène et d'azote auquel était associée une petite quantité de  $\text{CO}_2$  et de vapeur d'eau.

Ainsi en est-on arrivé progressivement à la définition de l'élément chimique : il s'agit du terme ultime de l'analyse chimique, terme qu'on ne peut pas décomposer en matière plus simple ; et c'est ce qui a permis à Lavoisier d'éliminer la théorie du phlogistique et de rénover la chimie. À partir de là, il devenait possible d'avancer dans les connaissances de manière beaucoup plus rationnelle.

### *Développement de la chimie appliquée à l'agriculture*

Les nombreuses analyses chimiques de végétaux effectuées en s'appuyant sur les conceptions de Lavoisier ont montré que ceux-ci étaient constitués d'un certain nombre d'éléments chimiques majeurs, qui étaient donc indispensables à leur développement ; il s'agit de : C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg. Ceci étant admis, on a eu à répondre à deux nouvelles questions, et tout d'abord d'où proviennent les éléments nécessaires à la croissance des plantes et ensuite, sous quelle forme ou dans quel état se produit l'assimilation de l'élément par le végétal ?

En réalité au début du 18<sup>e</sup> siècle, un tel problème ne se posait pas exactement dans des termes aussi nets en sorte que, dans les différents travaux réalisés, les deux aspects ont souvent été mélangés ou confondus, ce qui a contribué à retarder la résolution définitive des problèmes.

## Origine des éléments chimiques nécessaires à la croissance des plantes

L'origine de l'oxygène et l'hydrogène n'a jamais prêté à discussion ; un consensus s'est établi rapidement pour les faire venir de l'air et de l'eau. Il n'en a pas été de même pour le carbone, l'azote et les éléments minéraux ; et c'est ce qui a contribué à la multiplication des hypothèses et théories relatives à la nutrition carbonée, à la nutrition azotée et à la nutrition minérale, trois points que nous allons voir maintenant.

L'origine du carbone intervenant dans la nutrition carbonée a fait l'objet des plus grandes divergences. En bref, la question était la suivante : le carbone des plantes vient-il de l'air ou bien du sol par l'intermédiaire de l'humus issu de la décomposition des résidus végétaux ? Les travaux expérimentaux de Ingenhousz (1779), de Virey (1803), puis surtout de Senebier (1782) et de de Saussure (1804) font apparaître nettement que le carbone vient de l'air, et que cela résulte de la fixation du CO<sub>2</sub> en relation avec le processus de photosynthèse.

En revanche, pour Wallerius (1761), Hassenfratz (1792), puis Patrin (1803), la source du carbone des plantes se trouve avant tout dans l'humus, c'est-à-dire dans la fraction organique de la terre végétale. Cette vision s'insère dans ce qu'on a appelé « la théorie de l'humus » qui fait venir du sol (humus) l'alimentation carbonée des plantes ; c'est d'ailleurs la vision générale reprise et développée par le grand agronome allemand Thaer (1811-1816, édition en français) qui perdurera plus ou moins dans beaucoup d'esprits jusqu'en 1840. Le carbone proviendrait pour ces différents auteurs de la dissolution du charbon de la matière végétale du sol aboutissant à des solutions nutritives contenant du carbone soluble.

L'origine de l'azote participant à la nutrition azotée a aussi été l'objet de nombreuses controverses. L'azote provient-il de l'air ou du sol. Étant donnée la composition de l'atmosphère, il était tentant de faire venir cet élément de l'air. Liebig lui-même s'accrocha longtemps à cette idée ; pourtant de Saussure, encore lui, avait montré dès 1804, en s'appuyant sur des expériences très minutieuses, qu'il n'en était pas ainsi et que l'azote provenait en réalité des constituants organiques du sol ; naturellement via l'air lors de l'émergence de la biosphère

il y a 3,5 milliards années (par l'intermédiaire des microorganismes autotrophes ou mieux diazotrophes). Notons ici qu'on montrera plus tard que, dans le cas des légumineuses, l'azote atmosphérique participe directement à la nutrition.

L'importance des éléments minéraux, si l'on en croit de nombreux historiens de la science du sol, semble avoir été bien évoquée il y a déjà trois siècles, par Palissy (cf. édition de 1880) dans sa « théorie des sels »<sup>1</sup>, puis, ceux-ci (les éléments minéraux) avaient été complètement délaissés. Rappelons que Dumas et Boussingault dans leur magistrale étude : « Essai de statique des êtres organisés » (1844) n'avaient mis l'accent que sur les éléments organiques C, H, O et N et non les nutriments minéraux.

En fait, c'est à travers la question des cendres végétales que Liebig a pressenti à la même époque leur importance et qu'il a proposé sa théorie de la nutrition minérale des plantes (1840 pour la version allemande, 1841 pour la traduction française). Mais ce faisant, ce n'est plus à proprement parler de l'origine des éléments minéraux dont il est alors question, mais bien de la forme d'assimilation des éléments du sol par les végétaux, et ce, quelle que soit leur provenance (lithologique ou organique).

### Forme d'assimilation

Cet aspect du problème est bien entendu en relation avec la nature des réservoirs en éléments nutritifs, dont nous venons de parler mais se situe à un autre niveau. En fait on a assisté, là encore, à la confrontation de deux grandes conceptions théoriques.

La première est contenue dans la théorie de l'humus qui veut que la plus grande partie de la nourriture nécessaire à la plante arrive directement au végétal en solution organique (notion de sucs nourriciers). Elle fut développée ou soutenue par différents auteurs, notamment par Thaer (1811-1816) et Davy (1813). C'est ce qui a été rassemblé par Bourguet (1678-1742) dans la formule : « l'organique

---

<sup>1</sup> Notons ici qu'à l'époque de B. Palissy, le mot « sels » recouvrait bien d'autres choses que les sels minéraux tels qu'on les conçoit à notre époque. Voir à ce sujet l'article de C. Feller, p. 181.

produit l'organique » et qui reprend, en quelque sorte l'aphorisme latin *similia similibus curantur* (un organisme se nourrit de préférence de ses semblables).

La seconde dérive de la théorie de la nutrition minérale des plantes, émise par Liebig, bien qu'il y avait déjà eu au moins un précurseur en la personne de Sprengel (1826, 1828, *in* Ploeg *et al.*, 1999). Liebig avait en effet constaté que le fumier n'agissait pas directement, mais qu'il intervenait indirectement par l'intermédiaire des produits minéraux qu'il contenait et qui étaient libérés progressivement au cours de sa décomposition. C'est ce qui le conduira plus tard à généraliser ce résultat et à proposer que la plupart des éléments, et notamment N, P, S, K, Na, Ca, sont assimilés par la plante sous une forme inorganique, que ceux-ci aient une origine lithologique (fraction minérale des sols) ou qu'ils proviennent de la constitution des résidus végétaux (cas de l'azote en particulier) ; ceci explique alors parfaitement l'intérêt de l'apport de fumier<sup>2</sup>.

Certes Liebig n'a pas toujours été à même de préciser la voie utilisée par la nature pour engendrer une forme minérale, notamment pour l'azote. Il a donc fallu effectuer bien d'autres travaux de recherche au cours de la seconde moitié du 19<sup>e</sup> siècle, après qu'on ait pu découvrir que la terre végétale était avant tout un milieu vivant contenant notamment une microflore abondante susceptible de développer une activité chimique qui lui est propre. C'est alors seulement qu'on a été amené à montrer le rôle joué par les micro-organismes du sol lors de la transformation de l'azote organique en azote minéral ( $\text{NO}_3^-$ ), et donc la nécessité de coupler dans le sol chimie et microbiologie. Il s'agit de toutes les études ultérieures sur la nitrification où se sont distingués, entre autres, Schloesing et Muntz (1877), Berthelot (1886) et Winogradsky (1890-1891).

Au demeurant, cette décomposition biologique s'est aussi avérée féconde pour bien d'autres éléments contenus dans les tissus végétaux, notamment P et S, dont l'assimilation par les plantes se fait sous forme de  $\text{PO}_4^{3-}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ .

---

<sup>2</sup> Notons ici la formulation de la question posée en 1840 par l'Académie royale de Goettingen : « Les éléments inorganiques des végétaux sont-ils utiles au développement de la plante ? ».



En définitive, c'est la théorie de la nutrition minérale basée sur le fait qu'en dehors du carbone, les végétaux ne peuvent absorber que des éléments dissous dans l'eau, qui a prévalu à partir de 1840 ; et c'est ce qui a conduit à proposer de compenser les exportations des cultures par un emploi systématique d'engrais minéraux ayant une certaine solubilité. C'est donc cette théorie qui est à la base du grand développement de la chimie agricole au cours de la seconde moitié du 19<sup>e</sup> siècle, discipline qui est devenue alors sans conteste la science de base de l'agronomie (au point de gommer toutes les autres disciplines-clés de ce secteur, même la génétique comme l'a si bien fait remarquer E. Schribaux).

Certes, depuis cette époque la chimie agricole, issue des écrits de Liebig et surtout de Boussingault (1843-1844), a fait faire de grands progrès à l'agronomie en se basant sur une analyse systématique des terres arables, puis en s'appuyant dès l'après-guerre sur les méthodes de la radiochimie (Barbier *et al.*, 1954, en France).

Mais en même temps, elle limitait le problème des relations sol-plante à la seule terre végétale et à l'étude des seuls transferts d'éléments entre le sol et la plante, sans prendre en compte la circulation des éléments entre les trois règnes de la biogéosphère, telle que celle-ci avait été entrevue par Lavoisier, et qui est à base de ce qui est devenu la biogéochimie, et qui avait donné lieu à une proposition d'un prix par l'Académie des Sciences pour l'année 1794, rédigée de la main de Lavoisier, et connue sous le titre « Prix sur la nutrition ». C'est un placard de 4 pages, publié par Dupont en 1792 dans les Mémoires de l'Académie. Ce prix n'a pas eu de suite puisque les Académies ont été supprimées le 8 août 1793 et que Lavoisier a été guillotiné le 8 mai 1794. Des extraits de ce texte ont été publiés par Boulaine (1989).

Or il est apparu assez vite à un certain nombre de naturalistes s'intéressant à la biosphère que cette manière de voir essentiellement chimique était bien trop restrictive, dans la mesure où d'abord elle effaçait complètement le rôle de la faune (Darwin, 1838, 1881, par exemple) ; par ailleurs, il devenait clair que la terre végétale ne constituait pas à elle seule tout le sol sur lequel se développent les plantes – et ceci est particulièrement vrai pour leur alimentation hydrique – sans parler des transferts latéraux susceptibles de se manifester au sein du manteau meuble, qui recouvre en général la surface des continents.

Il s'est donc avéré nécessaire d'élargir le champ des investigations, et c'est ce qui va conduire ultérieurement à faire intervenir tout l'épiderme fonctionnel de la biosphère avec ses aspects physique, chimique et biologique et à envisager alors une gestion biogéochimique des agrosystèmes.

## De la chimie agricole à la biogéochimie et à l'agrogéochimie

Cet élargissement a fait l'objet d'une série de nouvelles approches qui se situent à deux niveaux.

### *Émergence de la pédologie et développement de la géochimie de surface*

La chimie agricole reposait essentiellement sur la connaissance de l'état et du fonctionnement chimique d'une sorte de système clos : plante cultivée ↔ terre végétale, en sorte que la fertilisation des terres au champ servait avant tout à assurer la compensation des exportations par les récoltes et permettait ainsi de garantir une certaine stabilité du couple plante-terre de l'écosystème lors de la mise en culture.

En réalité, en aucun cas, on n'a affaire dans le milieu naturel à un système clos, puisqu'au cours du temps il peut se manifester souvent des entraînements d'éléments chimiques (on parle de lixiviation et de lessivage), qu'ils soient d'origine lithologique ou bien venant des engrais, entraînements qui sont susceptibles de se faire vers les horizons inférieurs du sol, vers les matériaux rocheux de sub-surface et enfin vers les nappes ; tout ceci se déversant in fine dans le réseau hydrologique général.

Le problème ultérieur a donc été de faire intervenir tous ces processus dans le fonctionnement des terres, qu'elles soient cultivées ou non. C'est ce qui est à la base de l'émergence de la pédologie, qui avait

été pressentie déjà par Buffon (Feller et Blanchart, 2004) à la fin du 18<sup>e</sup>, mais qui s'est réalisée dans la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle ; ce terme ayant été créé auparavant par Fallou (1862) et les premiers éléments mis en place par plusieurs auteurs, dont Darwin (1838), Sprengel (1837) et Muller (1879, 1884, 1887 et 1889 pour les traductions allemande et française) au milieu du 19<sup>e</sup> siècle. Mais c'est Dokouchaev (1883) qui a finalement conceptualisé cette manière de voir, à savoir, le sol est un ensemble caractéristique des surfaces continentales ; il constitue par lui-même un « objet naturel » en interaction chimique permanente, avec la faune, la rhizosphère et l'eau qu'il contient en son sein, avec les roches qui se situent en dessous, et enfin avec l'atmosphère (qui règle les conditions climatiques) et la végétation aérienne qui se trouvent au-dessus.

Cette approche pédologique a surtout été connue par ses digressions autour des problèmes de classification et de nomenclature ; elle a permis cependant de proposer à la chimie agricole un système général d'interprétation, et de faire de la pédologie un sous-ensemble de ce qui deviendra la biogéochimie.

Il est possible aujourd'hui de distinguer deux étapes dans le cours de l'évolution de la pédologie

Dans la première, la terre végétale est incorporée au sein d'un niveau meuble de surface plus épais, qui constitue le profil de sol. C'est celle de l'École de Dokouchaev développée en France par Aubert et Duchaufour (1956) et qui s'en tient à une vision essentiellement verticaliste. Elle a pu montrer, entre autres, que la terre végétale ne constituait que l'horizon superficiel (*epipedon*) et qu'elle était associée par des liens congénitaux aux niveaux sous-jacents. Elle a permis aussi de relier les comportements des éléments nutritifs de la chimie agricole à tous les autres éléments de la biogéosphère, donc à donner à celle-ci une assise géochimique, dont une des applications par exemple a été la réalisation d'une carte pédogéochimique de la France par Pédro et Scherer (1974), puis de celle du Brésil par Melfi et Pédro (1978).

Une telle conception a été une grande avancée dans la compréhension des types de sols développés sur les surfaces continentales des diverses zones climatiques, mais en particulier sur celles des zones tempérées (surtout quand ces dernières avaient été auparavant rabotées par les glaciations quaternaires).

Dans une seconde étape, la terre végétale est à incorporer à tout l'ensemble fonctionnel de la géosphère terrestre, ce qui implique de mettre en œuvre une épaisseur bien plus grande que la zone pédologique comme lieu des interactions chimiques et biologiques. Il peut s'agir ici :

- soit des horizons meubles profonds formés par altération (altérites), surtout dans les régions tropicales. Ces horizons sont épais et incorporent souvent une nappe phréatique. Ils ont fait l'objet en France des travaux de A. Lacroix (1913) et de Millot (1963) et sont à l'origine de l'émergence de la « géochimie de surface » ;
- soit des niveaux sous-jacents de roches poreuses ou fissurées, sièges de transferts hydriques non négligeables et qui sont susceptibles d'intervenir dans l'alimentation hydrique des plantes.

Il convient par ailleurs d'apporter une dimension latérale aux phénomènes, en reliant génétiquement et donc hydrochimiquement les processus de l'amont aux processus de l'aval au sein d'un interfleuve ou d'un bassin versant. La notion première de type de sol s'efface quelque peu dans ce cas, au point qu'on a été amené à parler d'abord de chaînes de sol, la catena de Milne (1935a, b), puis de couverture pédologique continue. Ceci nous conduit au terme de notre parcours commencé au 18<sup>e</sup> siècle, parcours qui en définitive nous a fait aller de la plante à l'humus, de l'humus à la terre végétale, de la terre au type de sol, du type de sol à la couverture pédologique, enfin de la couverture pédologique au fonctionnement biogéochimique du bassin versant.

### *Introduction de la biogéochimie et mise en place de l'agrogéochimie*

À partir de là, si l'on fait un retour vers les problèmes de la nutrition des plantes, on est conduit in fine à faire ressortir deux aspects principaux.

- (a) La première constatation importante est que la gestion des agrosystèmes doit s'appuyer dorénavant sur les conceptions biogéochimiques du grand savant russe Vernadsky (1924, 1929), mettant un accent majeur sur la circulation de l'énergie et de la matière (donc des éléments chimiques et de l'eau) au sein de la biosphère.

Pour ce qui concerne le problème de ce jour, cela signifie qu'il faut dorénavant faire intervenir dans nos raisonnements agronomiques un grand nombre de paramètres qui avaient été délaissés dans l'optique de la seule chimie agricole, et par exemple le fonctionnement biochimique des plantes au cours de leur cycle cultural, le rôle de la macrofaune et de la structuration « naturelle » des horizons du sol, la décomposition microbienne des racines et des résidus végétaux et animaux, les apports atmosphériques, les remontées minérales – par les racines et la faune – depuis les zones profondes du sol, les apports latéraux en provenance de l'amont du bassin à la fois par voie superficielle (ruissellement, érosion) et par voie hydrique sub-superficielle (lessivage oblique). Depuis l'apparition de la chimie agricole, l'échelle d'analyse des relations sol-plante a bien changé et s'est grandement élargie.

(b) Le second aspect est que la nutrition des végétaux doit reposer à notre époque, non seulement sur la connaissance des différents processus hydrogéochimiques au niveau du bassin versant, mais surtout sur leur couplage ; ce qui implique de faire intervenir simultanément durant la période culturale le cycle biogéochimique des éléments nutritifs et le cycle hydropédologique. C'est à ce titre seulement que la chimie agricole d'hier peut prendre une assise écologique (écologie des sols) et qu'elle deviendra une véritable agrogéochimie. Cette manière de voir semble en effet la meilleure pour appréhender le fonctionnement réel du sol et, par là même, pour piloter une fertilisation plus adaptée des cultures, c'est-à-dire évitant au maximum les pertes tout en assurant à la fois une économie d'intrants et une protection de l'environnement (Hénin, 1980). L'agrogéochimie constitue donc bien désormais le socle scientifique sur lequel devrait s'appuyer dans le futur tout système d'agriculture qui se veut à la fois moderne et durable.

## Conclusion

De cette brève évocation des étapes successives qui ont caractérisé l'avancement des connaissances dans le domaine des relations « sol-plante » au plan chimique, il est permis de conclure en proposant trois remarques d'ordre général.

1°) La science, qui est une longue patience, avance toujours pas à pas. Elle doit dans tous les domaines s'appuyer sur de nombreuses observations, expérimentations au champ, essais de longue durée, expériences de laboratoire, modélisations, etc., toutes choses qui s'étalent très souvent sur plusieurs siècles.

2°) La science a déjà bien servi l'humanité. Ainsi, dans notre cas, il est bon d'insister sur le rôle majeur qu'a joué à partir du milieu du 19<sup>e</sup> siècle, grâce à la chimie agricole, la fertilisation en vue d'une augmentation de la production alimentaire de la planète. C'est elle qui, entre autres, a contribué à la disparition de certaines disettes ou famines qui se manifestaient il n'y a pas si longtemps dans nos propres contrées.

3°) En conséquence, l'investissement scientifique (intellectuel et matériel) doit être poursuivi. Mais il doit aussi être soutenu, et ce d'autant plus que de nos jours, la science a tendance à faire peur et que, ainsi que l'écrivait déjà en 1979 Jean Hamburger dans son livre « Demain les autres » : « L'antiscience est encore bien vivante ».

N'oublions donc pas aujourd'hui – comme l'histoire nous le montre – que la science a beaucoup apporté à l'agronomie, même si dans l'avenir il nous reste encore de nombreux points à éclaircir !

## Références<sup>3</sup>

Aubert G., Duchaufour P, 1956 —  
Projet de classification des sols.  
*Comptes Rendus 6<sup>e</sup> Congrès  
International de Science du Sol*  
(Paris), vol. E, 597-604.

Barbier G., Lesaint M.,  
Tyszkiewicz E., 1954 —  
Recherches au moyen d'isotopes

sur les phénomènes d'autodiffusion  
dans le sol et sur l'alimentation  
des plantes.  
*Annales Agronomiques*, 5, 923-959.

Berthelot M., André G., 1886 —  
Sur les principes azotés de la terre  
végétale. *Comptes Rendus Acad.  
Sciences*, 103, 1101-1104.

<sup>3</sup> Un certain nombre de références anciennes, signalées par \*, sont tirées de Browne (1944).

- Black J., 1803 —  
*Lectures on the Elements of Chemistry*, delivered in the University of Edimburg; by the late Joseph Black. Published from his manuscripts by J. Robinson. Longman and Rees, London, and William Creech, Edimburgh, 2 vol.
- Boulaine J., 1989 —  
*Histoire des pédologues et de la science des sols*. Inra, Paris, 285 p.
- Boulaine J., 1992 —  
*Histoire de l'agronomie en France*. Lavoisier Ed., Paris, 392 p.
- Bourde A., 1967 —  
*Agronomie et Agronomes en France au XVIIIème siècle*. École Pratique des Hautes Etudes, Sevpen, Paris, 3 vol., 1740 p.
- Boussingault J.B., 1843-1844 —  
Economie rurale considérée dans ses Rapports avec la Chimie, la Physique et la Météorologie. Béchet Jeune Libraire éd., Paris, 643 p. + 636 p.
- \* Browne C.A., 1944 —  
*A Source Book of Agricultural Chemistry*. Chronica Botanica, Vol. 8. Waltham publ. Mass., USA, 290 p.
- \* Cavendish H., 1766 —  
Three Papers, containing Experiments on factitious Air. *Phil. Trans. Royal Society*, 56, 141-184.
- Chaptal Cte de, 1823 —  
*Chimie appliquée à l'agriculture*. 2 vol., Huzard, Paris, 298, 484 p.
- Darwin C., 1838 —  
On the formation of mould. *Proc. Geol. Soc. London*, 2, 574-576.
- Darwin, C., 1881 —  
The formation of vegetable mould through the action of worms with observations of their habits. J. Murray Eds., London, 328 p.
- Davy H., 1813 —  
*Elements of Agricultural Chemistry, in a Course of Lectures for the Board of Agriculture*. Longman, Hurst, Rees, Orne and Brown, London.
- Davy H., 1813 —  
*Elements of Agricultural Chemistry*. 1<sup>st</sup> ed., London.
- Dokouchaev V.V., 1883 —  
*Le Chernozem Russe*. St. Pétersbourg.
- Duhamel du Monceau H.L., 1750-1756 —  
*Traité de la culture des terres suivant les principes de M. Tull, Anglais*. 6 vol., Paris.
- Dumas J.B.,  
Boussingault J.B., 1844 —  
*Essai de statique des êtres organisés*. Leçon professée par M. Dumas le 20 août 1841 pour la clôture de son cours à l'École de Médecine, 3<sup>e</sup> éd. Paris, Fortin, Masson et Cie.
- Fallou F.A., 1862 —  
*Pedologie oder allgemeine und besondere Bodenkunde*. Verl. Schönfeld, Dresden
- Feller C., Boulaine J., Pédro G., 2001 —  
Indicateurs de fertilité et durabilité des systèmes de culture au début du XIXe siècle. L'approche de Albrecht Thaër (1752-1828). *Etude et Gestion des Sols*, 8, 33-46.
- Feller C., 1997a —  
The concept of soil humus in the past three centuries. *Advances in GeoEcology*, 29, 15-46.
- Feller C., 1997b —  
La matière organique des sols : aspects historiques et état des conceptions actuelles. *C. R. Acad. Agric. de France*, 83 (6), 85-98.
- Hamburger J., 1979 —  
*Demain les autres*. Flammarion, Paris, 256 p.

- Hassenfrantz J.U., 1792 —  
Sur la nutrition des végétaux.  
*Annales de Chimie*, 13, 178-192 ;  
318-330 ; 14, 55-64.
- Hénin S., 1980 —  
*Rapport du groupe de travail*  
« *Activités agricoles et qualité*  
*des eaux* ». Ministère de l'agriculture,  
Ministère de l'environnement,  
Paris, 58 p.
- \* Ingen-Housz J., 1779 —  
*Experiments upon vegetables*  
*discovering their great power*  
*of purifying the common air*  
*in the sunshine and of injuring it*  
*in the shade at night*. London.
- Lacroix A., 1913 —  
Les latérites de Guinée  
et les produits d'altération  
qui leur sont associés.  
*Arch. Mus. Histoire Naturelle*,  
5<sup>e</sup> série, 255-356.
- Lavoisier A.L., 1789 —  
*Traité élémentaire de chimie*,  
*présenté dans un ordre nouveau et*  
*d'après les découvertes modernes*.  
Paris, Cuchet Libr., 2 vol.
- Liebig J., 1840 —  
*Die Chemie in ihrer Anwendung*  
*auf Agrikultur und Physiologie*.  
Vieweg u.S., Braunschweig.
- Liebig J., 1841 —  
*Chimie organique appliquée*  
*à la Physiologie végétale*  
*et à l'Agriculture*. Gerhardt C. (trad.),  
Fortin Masson et Cie, Paris, 437 p.
- Melfi A.J., Pédro G., 1977 —  
Estudo geoquímico dos solos  
e formações superficiais do Brasil.  
Parte 1. Caracterização e repartição  
pedogeoquímica. *Rev. Brasil.*  
*de Geociencias*, 7, 271-296.
- Melfi A.J., Pédro G., 1978 —  
Estudo geoquímico dos solos  
e formações superficiais do Brasil.  
Parte 2. Considerações sobre os  
mecanismos geoquímicos envolvidos  
na alteração superficial e sua  
repartição no Brasil. *Rev. Brasil.*  
*de Geociencias*, 8, 11-22.
- Millot G., 1963 —  
*Géologie des argiles*.  
Masson Paris.
- Milne G., 1935a —  
Some suggested units of  
classification and mapping,  
particularly for East African soils.  
*Soil Research*, 4, 183-198.
- Milne G., 1935b —  
Composite units for the mapping  
of complex soil associations.  
*Trans. 3<sup>rd</sup> International Congress*  
*of Soil Science* (Oxford),  
vol. 1, 345-347.
- Müller P.E., 1879 —  
Studier over Skovjord,  
som Bidrag til Skovdyrkingens Teori.  
Om Bøgemuld og Bøgemor  
paa Sand og Ler.  
*Tidsskrift for Skovbrug*, 3, 1-124.
- Müller P.E., 1884 —  
Studier over Skovjord, som Bidrag  
til Skovdyrkingens Teori. Om Muld  
og Mor i Egeskove og paa Heder.  
*Tidsskrift for Skovbrug*, 7, 1-232.
- Müller P.E., 1887 —  
*Studien über die natürlichen*  
*Humusformen und deren Einwirkung*  
*auf Vegetation und Boden*.  
Berlin.
- 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, 351 p.
- Palissy B. 1880 —  
*Les Oeuvres de Bernard Palissy*  
publiées d'après les textes originaux,  
avec une Notice historique  
et bibliographique et une Table  
analytique par Anatole France.  
Charavay éd., Paris, 499 p.
- Patrin, 1803 —  
Article : 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*,  
t. 11, Crapelet éd., Paris, 445-447.



- Pédro G., Scherer S., 1974 —  
Essai d'interprétation géochimique  
de la carte pédologique de France  
(1/1.000.000).  
*Annales Agronomiques*, 1, 5-48.
- Pédro G., 1996 —  
L'agronomie et son évolution  
dans le cadre de la recherche  
agronomique — in J. Craney (ed.) :  
*Inra, 50 ans d'un organisme de  
recherche*, 253-260.
- Ploeg R.R. van der, Böhm W.,  
Kirkham M.B., 1999 —  
On the origin of the theory  
of mineral nutrition of plants  
and the law of the minimum.  
*Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1055-1062.
- Priestley J., 1777 —  
*Expérience et observations sur  
différentes espèces d'air*.  
Translated from English by Gibbelin,  
5 vol., Nyon éd., Paris, 434 p.
- Saussure T. de, 1804 —  
*Recherches chimiques  
sur la végétation*. Nyon éd., Paris  
(Fac simile, Gauthiers-Villars, Paris,  
1957), 327 p.
- Schloesing T., Müntz A., 1877 —  
Sur la nitrification par les ferments  
organisés. *C. R. Acad. Sc.*, 84 :  
301-303 : 85, 1018-1020.
- Schribaux E., Nanot J., 1922 —  
*Botanique Agricole*. Baillière et Fils  
éd., Paris, 364 p.
- Sénequier J., 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*.  
3 vol., Genève.
- Sprengel C., 1826 —  
Ueber Pflanzenhumus, Humussäure  
und humussaurer Salze.  
*Arch. für die Gesammte Naturlehre*, 8,  
145-220. (Référence tirée de Ploeg  
*et al.*, 1999).
- Sprengel C., 1828 —  
Von den Substanzen der Ackerkrume  
und des Untergrundes.  
*Journ. für Technische und  
Ökonomische Chemie*, 2, 243-474 ;  
3, 42-99, 313-352 ; 397-421.  
(Référence tirée de Ploeg *et al.*,  
1999).
- Sprengel C., 1837 —  
Die Bodenkunde oder die Lehre  
vom Boden nebst einer vollständigen  
Anleitung zur Chemischen Analyse  
der Ackererden. Leipzig.
- Thaer A.D., 1811-1816 —  
*Principes raisonnés d'agriculture*.  
Traduit de l'allemand par E.V.B. Crud,  
J.J. Prechoud éd., Paris, 4 t., 372,  
266, 504, 473 p.
- Tull J., 1733 —  
*Horse-Hoing Husbandry : or an  
Essay on the Principles of Tillage  
and Vegetation*, London.
- Vernadsky W., 1924 —  
*La géochimie*.  
Alcan éd., Paris, 404 p.
- Vernadsky W., 1929 —  
*La biosphère*. Alcan éd., Paris, 203 p.
- Vilmorin L. de, 1856 —  
Note sur la création d'une nouvelle  
race de betterave à sucre.  
Considérations sur l'hérédité  
dans les végétaux.  
*C. R. Acad. Sc., Paris*, 871-874.
- Virey, 1803 —  
Article : Alimens, in : *Nouveau  
dictionnaire d'histoire naturelle  
appliquée aux arts, principalement  
à l'agriculture et à l'économie rurale  
et domestique*, t. 1, Crapelet éd.,  
Paris, 555-572.
- [Wallerius] Gymmenborg G.A.,  
1761 —  
*Agriculturae Fundamenta Chemica  
(Akerbrukets kemiska Grunder)*.  
A thesis conducted under Dr Johann  
Gottschalk Wallerius at the University  
of Uppsala, Sweden.
- Winogradsky S., 1890-91 —  
Sur les organismes de la nitrification.  
*C. R. Séances de Acad. Sc.*, 60 (19),  
1013-1016, 63 (2), 89-92.