

# Biogéochimie et écologie des sols

*Jean-François Soussana est directeur scientifique Environnement à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). Il est spécialiste de l'écologie des prairies et du cycle du carbone et de l'azote. Au cours de ses travaux, il étudie l'impact du changement climatique sur les prairies, ainsi que les contributions de celles-ci et de l'élevage à l'émission des gaz à effet de serre, en interaction avec la biodiversité et le fonctionnement des sols. C'est sur ce dernier point que porte le présent chapitre.*

## 1 Les sols, une ressource à protéger

### 1.1. Une ressource essentielle, non renouvelable

Les sols constituent une ressource essentielle mais non renouvelable à l'échelle d'une génération humaine, alors qu'elle rend des services multiples, que ce soit à travers la production d'aliments, de biomasse (voir à ce sujet les **Chapitres de P. Monsan** et **C. Rupp-Dahlem**), de matières premières minérales (voir le **Chapitre de B. Goffé**), à travers le stockage d'éléments tels que le carbone, la filtration de l'eau, ou encore pour héberger une riche biodiversité avec un patrimoine génétique très diversifié (**Figure 1**).

Les sols représentent donc un environnement physique

et un système biologique qui rend de nombreux services à l'homme, mais qui est soumis à de fortes pressions qui les menacent.

### 1.2. Une ressource menacée

Les menaces sur les sols concernent en particulier les pertes du fait de l'érosion (par l'eau ou le vent), des inondations ou encore de la salinisation, et il faut également citer la diminution de la matière organique dont nous verrons les conséquences importantes pour l'effet de serre et le cycle du carbone. Les sols sont par ailleurs soumis à des contaminations ponctuelles ou diffuses (voir le **Chapitre de J.-L. Morel**), à des dégradations physiques comme le tassement, ainsi qu'à des pertes de biodiversité, sans oublier

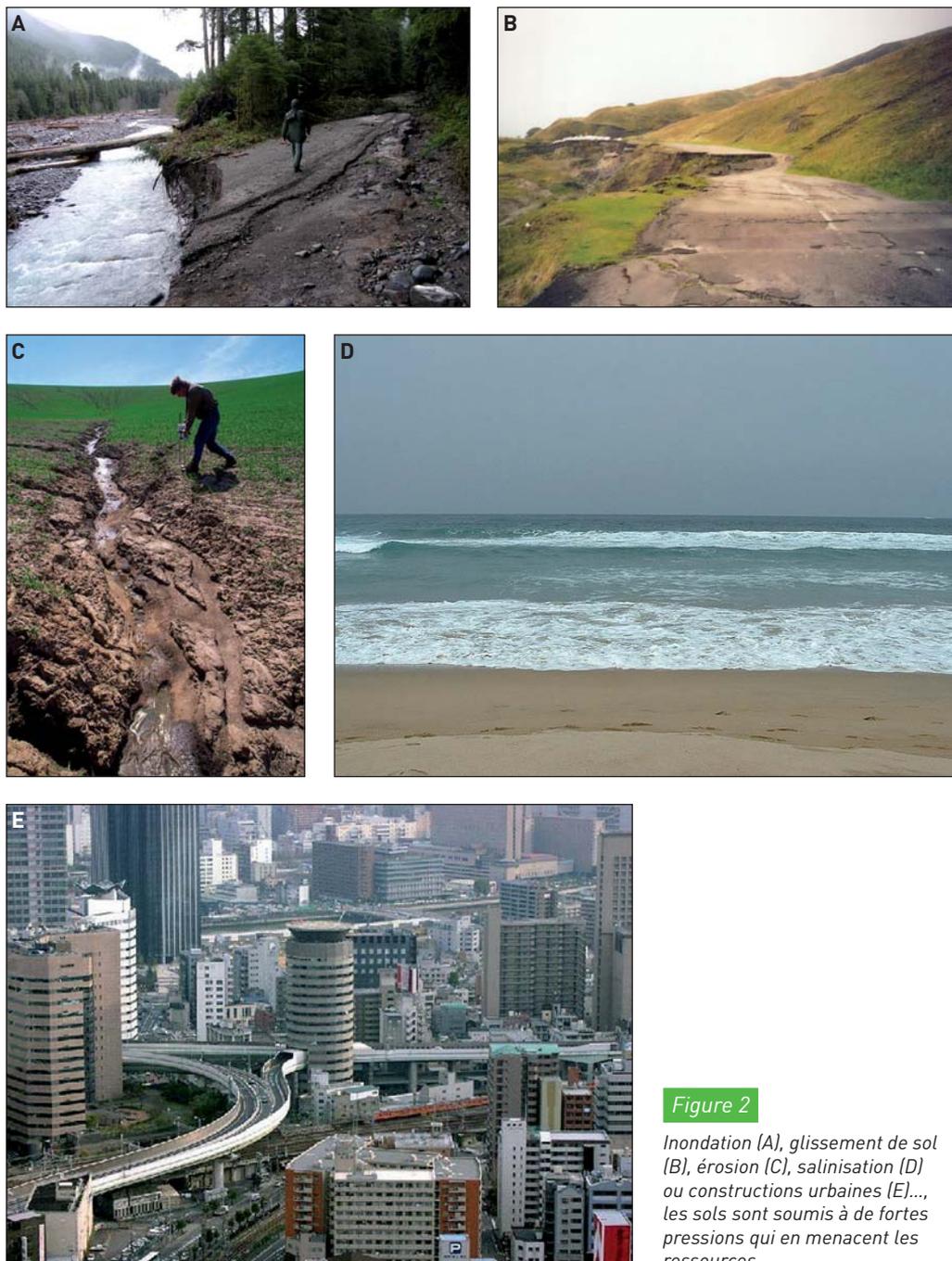


Figure 1

*Le sol, une ressource essentielle non renouvelable qui rend de nombreux services à l'homme en lui livrant sa biomasse, ses ressources, des habitats pour la biodiversité, et en contribuant aux cycles de la matière.*

l'artificialisation du fait de l'extension des environnements urbains qui stérilisent une partie des sols (*Figure 2*).

Il faut donc être vigilant sur tous ces points et étudier de près les conséquences de ces dégradations.



*Figure 2*

*Inondation (A), glissement de sol (B), érosion (C), salinisation (D) ou constructions urbaines (E)..., les sols sont soumis à de fortes pressions qui en menacent les ressources.*

## 2 L'agro-écologie, ou comment gérer les sols pour une production durable

### 2.1. La répartition des sols dans le monde

Si l'on souhaite limiter la contribution de l'agriculture à l'effet de serre, il est primordial de savoir gérer les sols, car ils contiennent trois fois plus de carbone que l'atmosphère (voir le cycle du carbone, *Chapitre de J. Amou-roux*). Une perte de carbone même minime à partir de cet énorme stock peut donc renforcer la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et contribuer ainsi aux changements climatiques.

Les stocks de carbone dans les sols sont géographiquement très variables (*Figure 3*), en fonction de facteurs principalement liés au climat, à la roche mère et à l'usage passé et actuel. Les zones de latitude élevée, les tourbières, les forêts et les prairies ont des stocks rela-

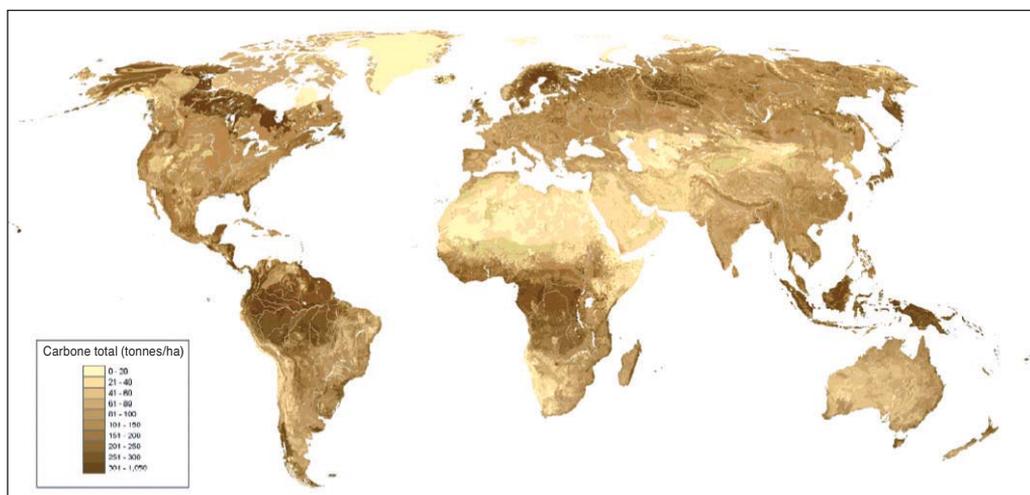
tivement élevés, de l'ordre de 100 à 200 tonnes de carbone par hectare, alors que les sols labourés, ou encore les sols des régions sèches, ont des stocks nettement plus faibles.

Si l'on examine l'évolution des sources et des puits de CO<sub>2</sub> atmosphériques depuis les années 1960, on constate l'augmentation au cours du temps des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion des énergies fossiles d'une part, et d'autre part aux changements d'usage des sols résultant en particulier de la déforestation (*Figure 4*).

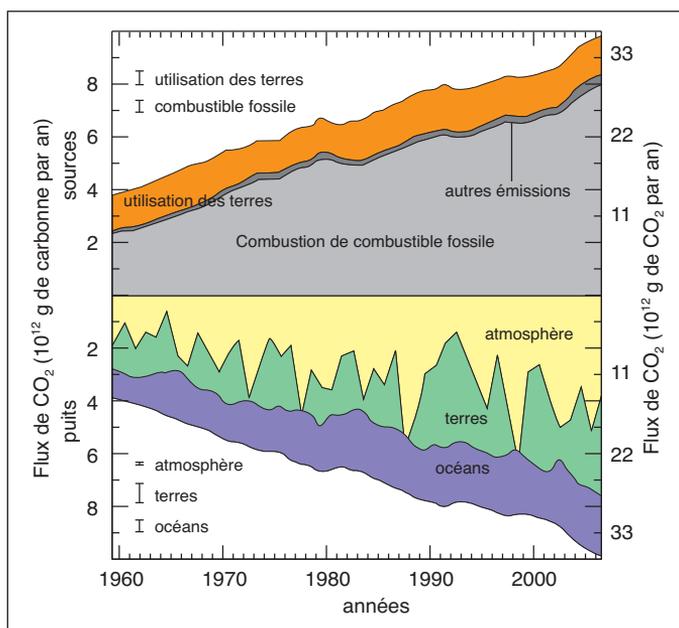
Contrairement à l'idée qui peut être parfois répandue, l'ensemble du CO<sub>2</sub> émis par les activités humaines ne s'accumule pas dans l'atmosphère, mais une partie importante est d'une part piégée dans les océans<sup>1</sup> et d'autre part par la surface verte des continents,

**Figure 3**

Les sols mondiaux contiennent près de trois fois plus de carbone que l'atmosphère.



1. Au sujet du stockage du CO<sub>2</sub> dans les océans, voir *La Chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009.


**Figure 4**

Évolution des flux de CO<sub>2</sub> émis par les activités humaines depuis 1960, par combustion des énergies fossiles et déforestation (graphe du haut, sources). Ces flux se distribuent (graphe du bas, puits) entre accumulation dans l'atmosphère et stockage de carbone sur les continents et dans les océans. On observe une forte variabilité interannuelle du stockage continental.

c'est-à-dire par les forêts et les sols de la biosphère continentale. Au contraire du stockage du carbone par les océans, le stockage dans la biosphère continentale varie beaucoup annuellement, comme le montre la **Figure 4**. Certaines années, le phénomène peut même s'inverser ; la biosphère des continents peut relâcher du carbone et contribuer ainsi à l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Comment étudier ces phénomènes, comment les relier au fonctionnement et à la dynamique des sols, en vue éventuellement d'en modifier les équilibres en faveur d'un développement durable ?

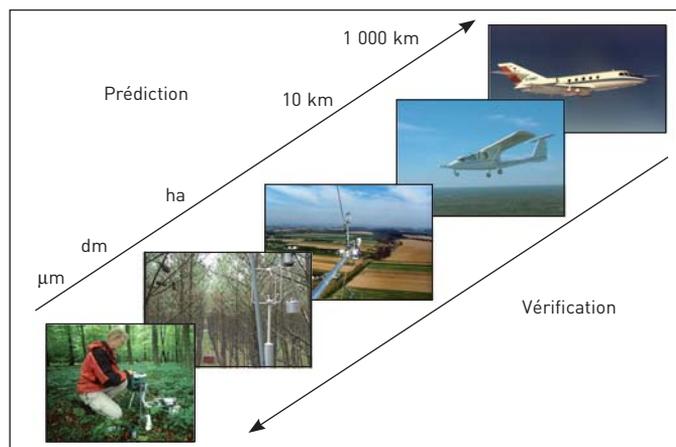
## 2.2. La gestion des sols européens

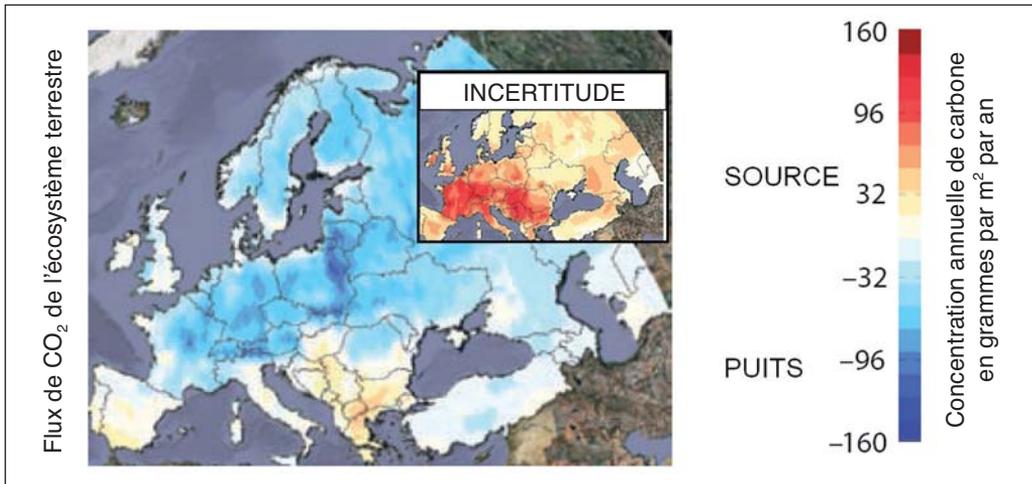
Dans le cadre de programmes européens de recherche, des données sont rassemblées

pour étudier les liens entre tous ces phénomènes : des avions survolent le continent européen pour mesurer les gradients de concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> (**Figure 5**), qui sont également suivis en continu depuis des tours hautes. Des mâts instrumentés mesurent de leur côté les flux turbulents de CO<sub>2</sub> échangés entre des

**Figure 5**

Une étude du bilan de carbone des surfaces continentales de l'Europe mobilisant avions, tours hautes et instrumentations de terrain, réalisée dans le cadre du programme européen de recherche CarboEurope IP.





**Figure 6**

*Puits de carbone des surfaces continentales en Europe (2000-2004).*

écosystèmes (forêts, prairies, cultures) et l’atmosphère ; des mesures renseignent la capacité photosynthétique des feuilles.

Toutes ces données sur le cycle du carbone sont rassemblées puis analysées en vue d’effectuer des projections à l’échelle régionale puis européenne. La **Figure 6** montre le résultat pour le bilan de carbone des surfaces continentales européennes, retraçant l’évolution des puits et des sources de carbone au cours des années 2000-2004, ces données ayant été vérifiées localement par des analyses sur le terrain.

On voit que les puits de carbone sont assez généralisés sur l’Europe (couleurs froides), tandis que les sources sont plutôt regroupées sur la frange méditerranéenne (couleurs chaudes). Des études ont montré que les puits sont dus pour la plus grande part aux forêts, résultant de l’accumulation du carbone dans le bois, ainsi que de son stockage dans les sols forestiers ; pour une autre part,

ils sont dus à son stockage dans la matière organique des sols de prairies. À l’inverse, les cultures, où la dégradation de la matière organique et la respiration du sol dominant, tendent à perdre un peu de carbone.

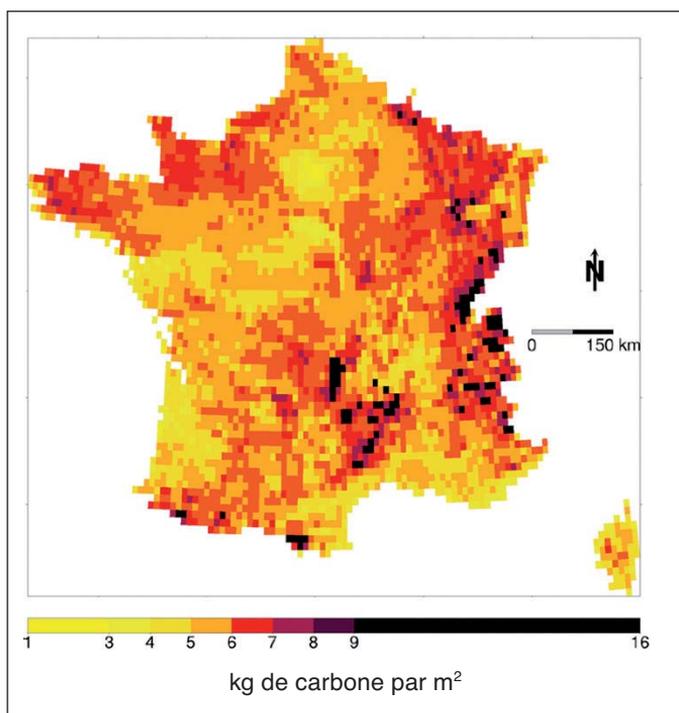
Néanmoins, il faut noter que toutes ces mesures (faites par inversion des gradients atmosphériques, ou par la méthode des flux turbulents) sont incertaines, compte tenu des difficultés méthodologiques pour les réaliser.

### 2.3. La gestion des sols français

Le Groupement d’Intérêt Scientifique national (GIS sols), qui étudie de manière systématique et spatialisée les sols français, vient de publier un rapport qui renseigne sur beaucoup de dimensions de l’état des sols français<sup>2</sup>.

La carte de la **Figure 7** montre l’évolution spatiale des stocks

2. Voir : [http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/CGAAER\\_10175\\_2011\\_Rapport.pdf](http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/CGAAER_10175_2011_Rapport.pdf)



**Figure 7**

*Stock de carbone organique dans l'horizon 0-30 cm des sols français. Maillage 16 x 16 km (Réseau de mesure de la qualité des sols, RMQS).*

de carbone organique dans la couche de surface (0-30 cm) des sols nationaux. Cette carte, récemment publiée, montre que la France dispose d'un stock important de 3,2 milliards de tonnes de carbone organique, alors qu'il faut se rappeler qu'en France, les émissions de carbone d'origine humaine ne sont que de l'ordre de 120 à 130 millions de tonnes. Ce résultat a été obtenu grâce à un maillage systématique de la France (réalisé par un réseau national de mesure de la qualité des sols), à partir de mailles de 16 x 16 km de l'ensemble des sols. À partir de ces mesures, le GIS ambitionne de suivre l'évolution temporelle de ces stocks de carbone.

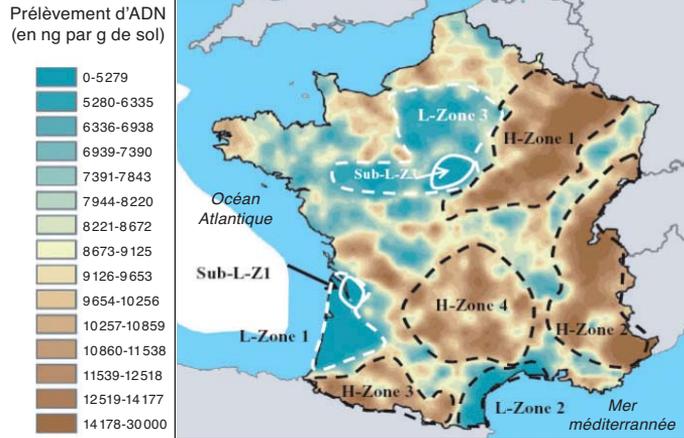
L'autre dimension intéressante de cette enquête na-

tionale est l'observation de la diversité biologique réalisée à travers la mesure de l'ADN microbien dans les sols français (**Figure 8**). On observe une variation spatiale importante : les zones à fortes concentrations en ADN microbien sont les zones de forêts et de prairies de montagne, tandis que les celles à faibles concentrations sont les zones urbaines ou de grandes cultures comme la région parisienne. On observe par ailleurs une corrélation spatiale entre la concentration en ADN microbien et la quantité de carbone organique dans les sols (voir la **Figure 7**).

Comment expliquer ce type de corrélation, et quel en est le lien avec le rôle des microorganismes dans le fonctionnement du cycle du carbone ?

Figure 8

Quantité d'ADN microbien des sols français.



### 3 Vers une meilleure connaissance de la matière organique des sols

#### 3.1. Une richesse qu'il faut connaître pour mieux la gérer

L'examen par microscopie électronique de la matière organique des sols montre un milieu extrêmement com-

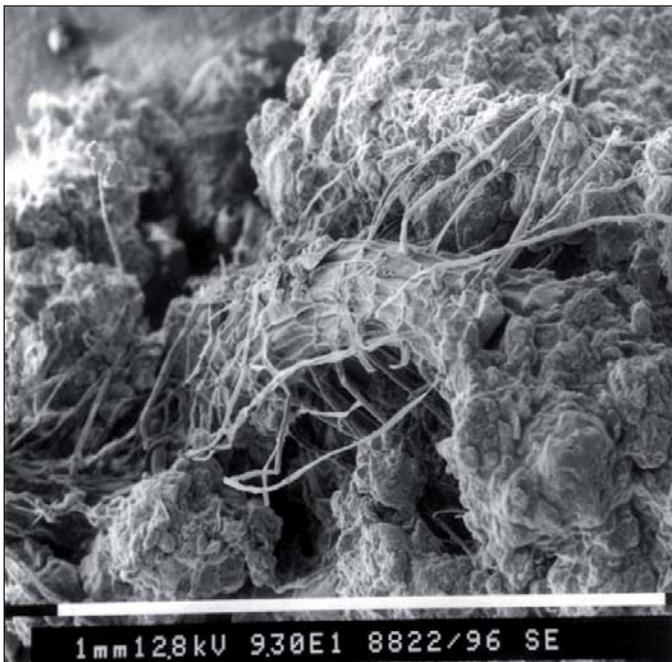
plexe d'interfaces entre les systèmes racinaires, les micro-organismes, les matières minérales et les matières organiques. La **Figure 9** montre la pénétration dans un sol de la racine d'une graminée pérenne (appelée le « ray-grass » anglais), avec ses poils racinaires qui vont permettre l'ancrage et le prélèvement des nutriments par les racines.

Les mécanismes qui permettent de comprendre la stabilité des matières organiques des sols sont en général décrits à partir de trois facteurs :

- la **récalcitrance chimique**, c'est-à-dire la présence de molécules relativement complexes. Dans l'exemple choisi, il s'agit de subérines<sup>3</sup>, qui sont

Figure 9

Image de microscopie électronique de matières organiques dans un sol, où l'on voit la racine d'une graminée pérenne.



3. La subérine est une substance cireuse très complexe présente au niveau de la tige ou des racines des végétaux (elle constitue le principal constituant du liège), et dont les constituants chimiques sont assez bien connus, mais sa structure macromoléculaire n'a pas encore été définitivement établie. Elle joue un rôle important dans la relation des plantes avec leur environnement.

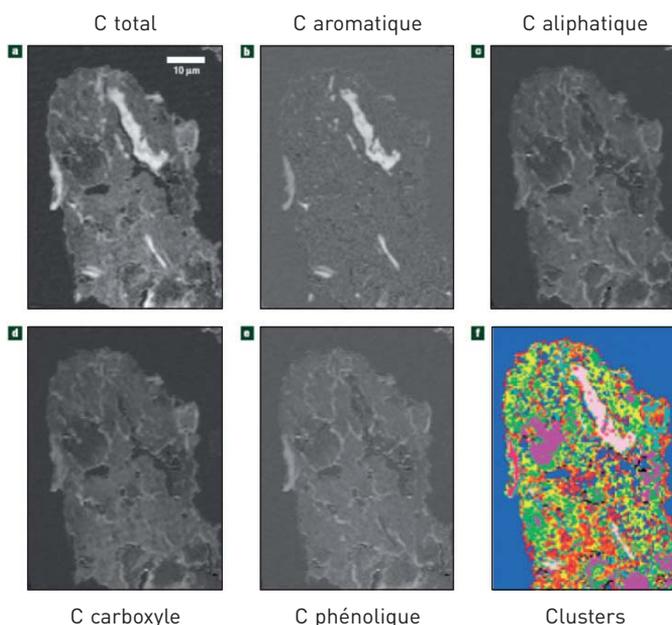
caractéristiques des parties racinaires. Ces molécules ont des chaînes ramifiées qui pourraient être « récalcitrantes » à la décomposition ;

- la **protection physique**, qui est liée au fait que les poils racinaires peuvent pénétrer dans les agrégats de matière organique, y mourir, y rester occlus et protégés des micro-organismes, ce qui conduit à une protection physique de la matière organique ;

- un **facteur mixte physique et chimique** lié à la stabilisation d'un certain nombre de composés organiques dans les argiles des sols.

### 3.2. L'apport des nouvelles méthodes d'analyse

Les méthodes spectroscopiques ont fait beaucoup progresser la caractérisation du carbone dans les micro-agrégats de matière organique des sols. La **Figure 10** montre les résultats d'une spectroscopie de rayons X réalisée grâce au rayonnement synchrotron sur un micro-agrégat (**Encart : « Le rayonnement synchrotron, pour pénétrer au cœur des sols »**). Cette technique permet d'identifier la localisation (respectivement dans les images a à f), du carbone total, du carbone des molécules aromatiques, des molécules aliphatiques, de celui des carboxyles (-COOH), des composés phénoliques et des clusters. On voit donc qu'à l'échelle de dix micromètres, il existe une variation extraordinaire des formes chimiques du carbone dans la matière organique des sols, montrant toute la complexité du phénomène.



Cette spectroscopie montre aussi qu'à l'échelle de 50 nanomètres, il existe des formes organiques identifiables de biopolymères d'origine végétale ou bactérienne, observés à des endroits distincts de la matrice minérale, sur laquelle ils sont donc finalement greffés (**Figure 12**). Ce résultat est important, car on pensait auparavant qu'il n'existait pas de molécules biopolymères caractérisables dans les sols et que la matière organique n'y était constituée que de molécules très condensées, très complexes, que l'on qualifiait d'humus, et qui s'assemblaient pour former des macromolécules humiques. Grâce à l'observation directe par spectroscopie de la matière organique, on sait maintenant que ces formes de biomolécules relativement simples existent, et qu'au contraire on n'a pas mis en évidence l'existence autrefois supposée de ces macromolécules humiques.

**Figure 10**

*Images par spectroscopie aux rayons X synchrotron de carbone montrant l'ultra-structure du carbone organique de micro-agrégats libres du sol.*

## LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON, POUR PÉNÉTRER AU CŒUR DES SOLS

Le **rayonnement synchrotron** est un rayonnement électromagnétique émis par une particule chargée qui se déplace dans un champ magnétique et dont la trajectoire est déviée par ce champ. Ce rayonnement est émis en particulier par des électrons qui tournent dans un anneau de stockage. Au cours de leur parcours, ces particules sont accélérées et émettent un rayonnement électromagnétique sous forme de photons. Les dernières avancées technologiques permettent de produire de la lumière d'une extrême brillance, allant de l'infrarouge aux rayons X durs.

L'instrument qui utilise ce phénomène est un **synchrotron** (Figure 11), grande machine dans laquelle des paquets d'électrons évoluent de façon pseudo-circulaire et sont accélérés jusqu'à atteindre des vitesses non négligeables par rapport à celle de la lumière, emmagasinent des énergies très importantes, de l'ordre du milliard d'électrons-volts. Lorsque ces électrons extrêmement énergétiques changent de direction, ils émettent des rayons X, qui sont canalisés dans des lignes de lumière. L'ensemble des rayons récupérés dans ces lignes forme le rayonnement synchrotron.

En plaçant un échantillon dans ces lignes de lumière, on accède directement à des informations sur sa composition, en temps réel, sans aucune dégradation sur le matériau : le rayonnement synchrotron est en effet très pénétrant et non destructif.

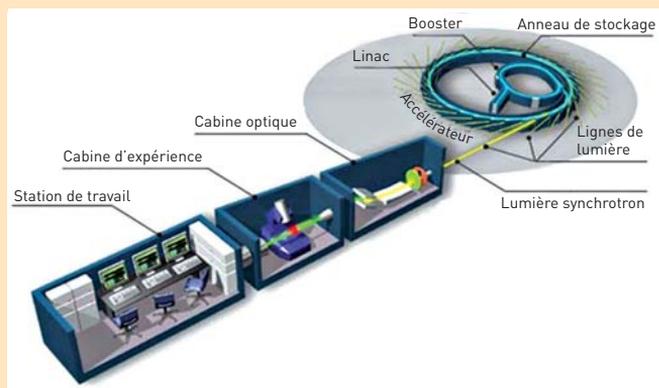


Figure 11

Schéma d'un synchrotron.

Cette observation peut conduire à remettre en question la récalcitrance des matières organiques des sols. Généralement, quand une plante se décompose, ses feuilles tombent, les glucides simples disparaissent rapidement, puis c'est au tour de la cellulose, et en dernier lieu la lignine, qui est effectivement récalcitrante à la décomposition microbienne en surface. En est-il de même dans un sol ?

Les observations montrent que ce n'est pas le cas, et que le temps de résidence dans un sol ne dépend pas de la nature de la matière organique ! Des expériences de marquage au carbone 13 – comme celles expliquées dans le **Chapitre de M. Rohmer** – ont en effet montré que la lignine s'y décompose tout aussi rapidement, voire même plus rapidement, que les protéines ou qu'un ensemble de glucides simples. Ces résultats contredisent

un bon nombre de données que l'on croyait connaître, et résultent ici d'une méta-analyse issue d'un ensemble d'expériences réalisées avec ce marquage par carbone 13. Ils s'expliquent notamment par le fait que les micro-organismes du sol sont à même de stocker et de recycler des composés dégradables, qui résident ainsi dans le sol pendant un temps aussi long que des composés récalcitrants comme la lignine.

Comment expliquer alors l'observation d'un carbone très ancien, si ce n'est pas par une cause chimique ?

### 3.3. La stabilité du stock de carbone des sols superficiels et des sols profonds

Selon les études, la stabilité du carbone superficiel d'un sol est de 10 à 300 ans, tandis que celle du carbone profond (au-dessous de 20 à 30 cm et jusqu'à 3 m) est très grande et peut atteindre 1 000 à 15 000 ans. Ce stock de carbone profond, extrêmement ancien, est plus important que celui du carbone de surface, que l'on connaît mieux jusqu'à présent (Figure 13). Comment expliquer la stabilité du carbone profond ?

L'origine de cette différence semble liée à l'apport de cellulose : au cours d'une expérience où l'on a marqué par carbone 13 et daté au carbone 14 des matières organiques<sup>4</sup> d'un prélèvement de sol en

4. Au sujet des marquages isotopiques, voir l'Encart : « Le traçage par isotopie des molécules pour traquer le polluant » du Chapitre d'É. Villenave de cet ouvrage.

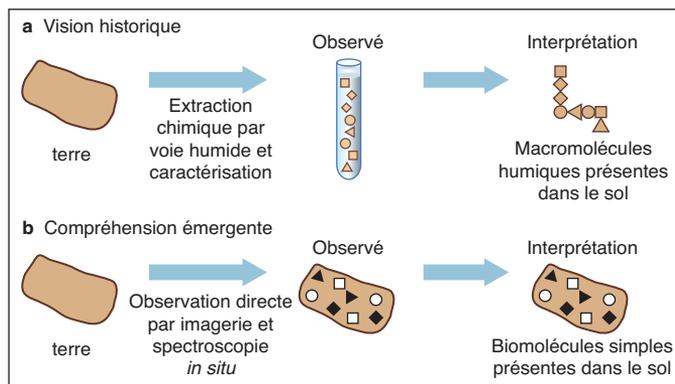


Figure 12

Macromolécules « humiques » ou biomolécules simples ? Historique des études sur la matière organique. A) Avec les méthodes anciennes d'extraction par voie humide, on imaginait, par reconstitution à partir de molécules observées sous forme individuelle, qu'il y avait dans le sol des macromolécules humiques qui correspondaient à l'assemblage de formes relativement plus simples ; B) cette interprétation est maintenant contredite par l'observation directe en spectroscopie de la matière organique, qui montre que ces formes existent en fait bel et bien dans le sol, et qu'il ne s'agit pas de formes complexes et humiques de macromolécules.

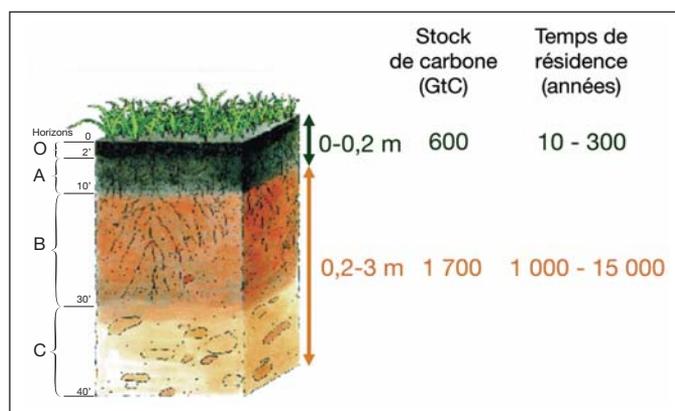


Figure 13

Le carbone profond est plus stable et plus important que le carbone superficiel.

profondeur dans une prairie, on a constaté, après incubation sans apport exogène, que la biomasse microbienne n'évolue pas. En revanche, avec ajout de cellulose, on observe le développement et la respiration accélérée de cette matière organique ancienne (Figure 14). Cet apport a donc

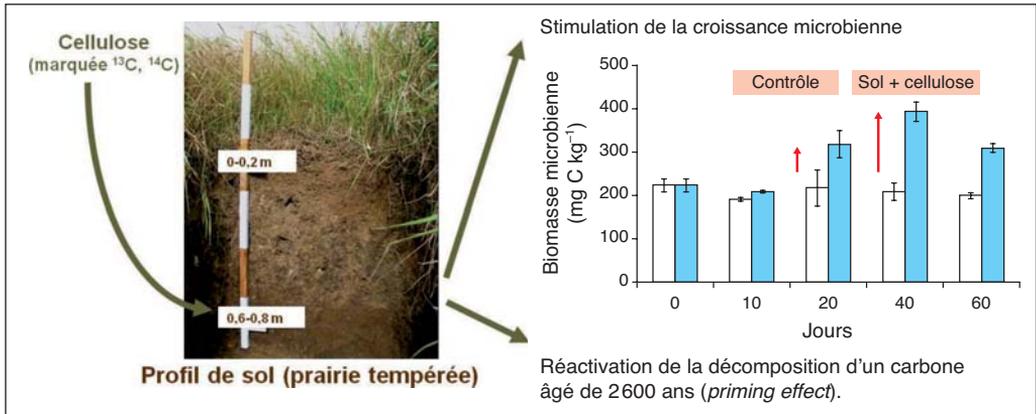


Figure 14

L'apport de cellulose réactive la décomposition du carbone profond âgé de plusieurs millénaires. La stabilité du carbone profond tiendrait à l'absence de substrat stimulant la croissance microbienne.

réactivé la décomposition d'un carbone qui a 2 600 ans !

Ce résultat suggère bien que la stabilité du carbone profond résulterait de l'absence de substrat stimulant la croissance microbienne, ce que l'on appelle le « priming effect », signifiant que le carbone facilement décomposable réactive la décomposition des formes de carbone ancien.

Des études approfondies ont montré en particulier que l'apport de cellulose développe la croissance de champignons dits cellulolytiques (ils accélèrent la décomposition de la matière organique), qui se développent non seulement lorsqu'on apporte de la cellulose aux sols, mais également en cas de carence en azote. Ces champignons expliqueraient ainsi le « priming effect », et l'interprétation qui est donnée actuellement est que leur activité contrôlerait le rapport carbone-azote dans le cycle de stockage ou déstockage de la matière organique.

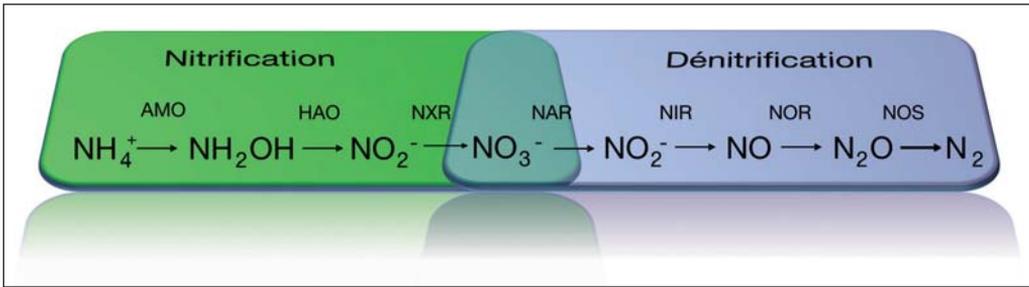
Comment utiliser cette nouvelle connaissance pour mieux protéger les sols ?

## 4 Une protection de l'environnement inspirée par le cycle biogéochimique de l'azote dans les sols

### 4.1. Une connaissance du cycle de l'azote

Ces interactions entre les acteurs microbiens et les phénomènes liés à des cycles biogéochimiques sont très importantes, comme le montre le cycle de l'azote, dont les étapes importantes pour l'environnement sont représentées sur la **Figure 15**.

Ces grandes étapes sont : la **nitrification**, c'est-à-dire le passage de l'ammonium  $\text{NH}_4^+$  au nitrate  $\text{NO}_3^-$ , et la **dénitrification**, qui est le passage du nitrate jusqu'au produit ultime, à savoir le diazote  $\text{N}_2$ , composé stable dans l'atmosphère. Il faut aussi mentionner que les étapes intermédiaires conduisent chaque fois, pour la nitrification comme pour la dénitrification, à une perte de protoxyde d'azote,  $\text{N}_2\text{O}$ , gaz à effet de serre puissant. On sait en outre que l'ion nitrate peut être perdu ou lessivé dans



l'environnement, polluant ainsi les nappes phréatiques. Peut-on contrôler ces phénomènes ?

Figure 15

Évolution de la nature des acteurs microbiens observée selon les étapes du cycle biogéochimique de l'azote, engageant les enzymes AMO, HAO, NXR, NAR, NIR, NOR et NOS.

#### 4.2. Le rôle important des racines

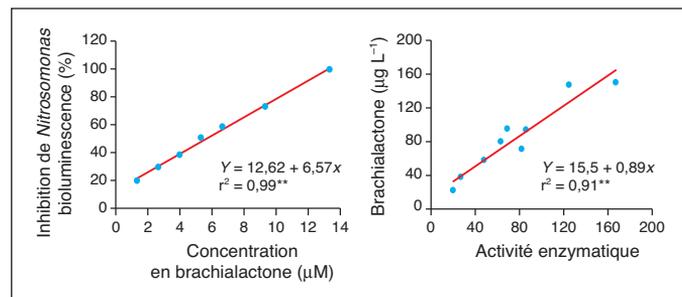
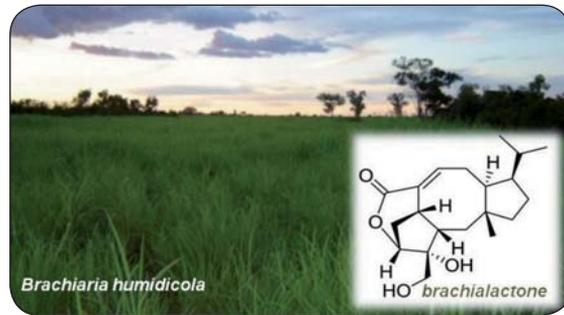
Au cours d'études menées en Côte d'Ivoire, des équipes du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) ont mis en évidence le rôle d'un certain nombre d'interactions racinaires dans les processus du cycle de l'azote. Ils ont observé que les racines de graminées pérennes comme les *Brachiaria* exsudent un composé, la brachialactone, qui bloque l'activité des *nitrosomonas*, bactéries responsables de la nitrification (Figure 16). Ces travaux montrent en effet que l'inhibition des *nitrosomonas* dépend linéairement de la concentration en brachialactone. La rhizosphère<sup>5</sup> de la graminée stoppe donc la nitrification, et permet à la graminée de prélever directement l'ion ammonium en stoppant la création de nitrates dont ses compétiteurs ont besoin ;

c'est ainsi que la graminée limite le développement des plantes compétitrices.

Généraliser ce type de stratégie serait avantageux pour l'environnement car elle limite à la fois l'émission du protoxyde d'azote et le lessivage des nitrates (Figure 17).

Figure 16

Importance du carbone exsudé sous forme de molécule brachialactone par les racines de graminées pérennes *Brachiaria humidicola*.



5. Au sujet des rhizosphères, voir le [Chapitre de J.-L. Morel](#) de cet ouvrage.

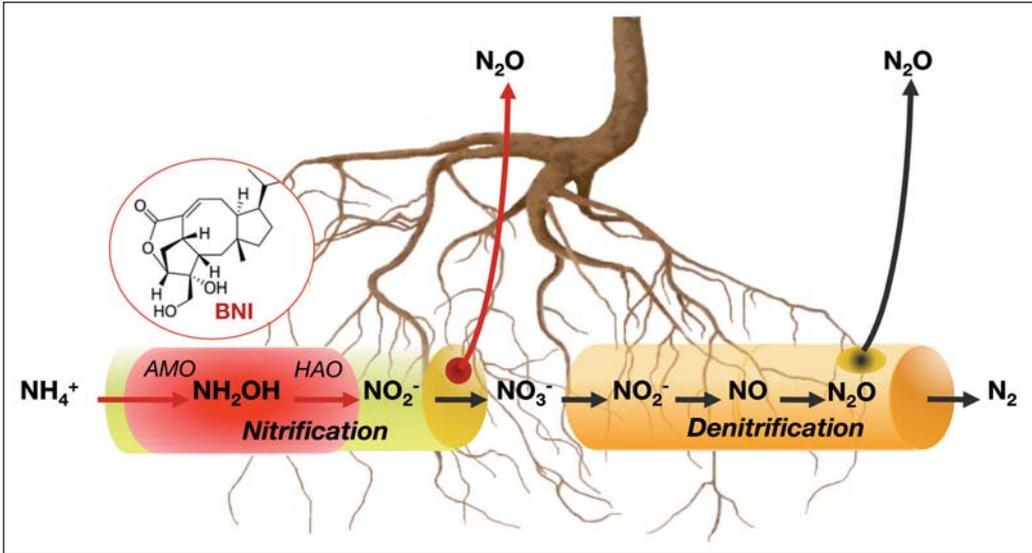


Figure 17

Inhibition de la nitrification par la brachialactone.

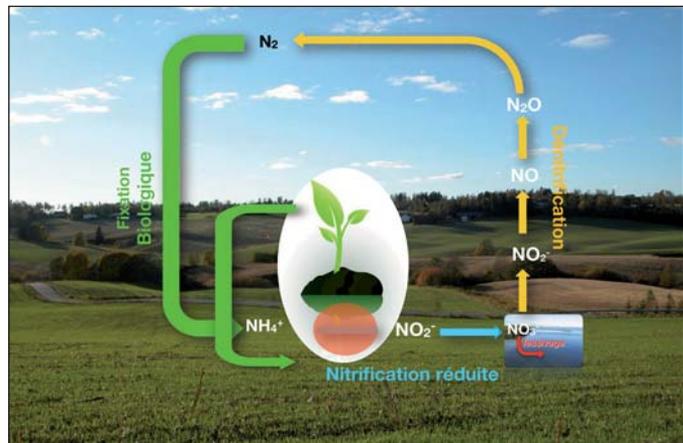
#### 4.3. Vers de nouvelles stratégies agro-écologiques

Ces connaissances récentes nous conduisent à imaginer de nouvelles stratégies de recherche agro-écologique en vue contrôler l'effet de serre : l'inhibition de la nitrification par des exsudats racinaires contenant de la brachialactone, combinée à un apport

d'azote par fixation biologique de plantes légumineuses, permettrait à la fois de réduire les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  et de réduire les pertes de carbone des sols liées au priming effect. On disposerait ainsi de leviers agro-écologiques pour stabiliser le stock de carbone des sols et pour limiter l'effet de serre (Figure 18).

Figure 18

Cycle de l'azote avec réduction du « priming effect » et stockage accru du carbone dans le sol grâce aux exsudats et litières riches en azote.



## **Vers une ingénierie agro-écologique ?**

La connaissance et le suivi systématique et spatialisé des sols est indispensable à leur bonne gestion. L'écologie microbienne est aujourd'hui l'une des clés pour comprendre les cycles du carbone et de l'azote. Le sol apparaît comme un réacteur chimique complexe, dont les propriétés sont exceptionnelles et dont la compréhension des interactions entre les plantes, les micro-organismes et la matière organique débouchera sans doute sur une ingénierie agro-écologique, pour préserver l'environnement durablement, et en particulier la richesse des sols, dont nous avons tant besoin.

# Crédits photographiques

Fig. 1E : J.P. Gallerand – <http://44.svt.free.fr>

Fig. 3 : source : UNEP, FAO, JRC 2010.

Fig. 4 : d'après Canadell *et coll.* (2007), PNAS.

Fig. 5 : projet CarboEurope.

Fig. 6 : Schulze *et coll.* (2009). *Nature Geoscience*.

Fig. 7 : Martin *et coll.* (2011). *Biogeosciences*.

Fig. 8 : d'après Dequiedt *et coll.* (2011). *Global Ecol. Biogeog.*

Fig. 9 : Rasse1 D.P. Rumpel1 C. Dignac M.-F. (2005). Is soil carbon

mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization, *Plant and Soil*, Springer.

Fig. 10 : Lehman *et coll.* (2008). *Nature Geosciences*.

Fig. 12 : d'après Schmidt *et coll.* (2011), *Nature*.

Fig. 13, 14 : d'après Fontaine *et coll.* (2007). *Nature*.

Fig. 15 : L. Philippot (INRA).

Fig. 16 : d'après Subbarao *et coll.* (2009). *PNAS*, **106** : 17302-17307.

Fig. 17 et 18 : Philippot et Hallin. (2011). *Trends in Plant Science*.