

De la recherche sur les sols à la décision publique :

**Le programme GESSOL (Gestion Durable des Sols), un
support à la Directive Cadre sur la Protection des Sols**

Journées d'échanges et de prospective

21 & 22 novembre 2006

RECUEIL DES INTERVENTIONS

**Journées organisées par le Ministère de l'Ecologie et du Développement durable
et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie**



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Remerciements

Le MEDD et l'ADEME remercie les auteurs pour leur contribution à cette publication

Organisation du colloque

Pour le MEDD

André-Bernard Delmas, Anne Lieutaud, Eric Vindimian

Le Conseil scientifique du programme GESSOL

Dominique King, Lucile Jocteur-Monrozier, Jacques Berthelin, Luc Thiebaut, Jacques Ranger, Jack Massé, Christophe Mouvet

Pour l'ADEME

Antonio, Bispo, Laëtitia Citeau, Isabelle Feix

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Objectifs des journées

Les sols remplissent des fonctions vitales pour les sociétés humaines et les écosystèmes. Or, cette ressource non renouvelable est soumise à des dégradations plus ou moins réversibles. Les menaces qui pèsent sur les sols sont notamment l'érosion, la diminution de matières organiques, la contamination, le tassement et la réduction de la biodiversité. Si cette dégradation des sols est un problème identifié depuis longtemps par la communauté scientifique, la question émerge seulement depuis quelques années dans la société. Elle se traduit aujourd'hui par la proposition récente de la Commission Européenne d'un projet de *Directive Cadre sur la Protection des Sols* (COM(2006) 232). Des recherches en soutien aux politiques publiques sont donc nécessaires afin de garantir une utilisation durable des sols et de préserver leurs multi-fonctionnalités.

Dans ce contexte et anticipant la demande, Le Ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD) a initié, orienté et soutenu dès 1998 des recherches sur les sols à travers le programme GESSOL (Gestion durable des Sols). Ce programme, séquencé en plusieurs phases, a regroupé plus d'une vingtaine de projets de recherche. Il avait pour objectif d'évaluer les évolutions de la qualité des sols qui conduisent à des dégradations des différentes fonctions et usages des sols : écologiques (le sol est un milieu vivant), environnementales (le sol a un rôle important vis-à-vis de la qualité de l'air et de la qualité de l'eau) et agronomiques (le sol est un déterminant de la qualité des produits alimentaires).

Si certaines recherches sont encore en cours, la plupart sont achevées et permettent dès à présent de tirer des enseignements quant aux outils et méthodes disponibles pour la gestion et la protection des sols. Afin de diffuser et de promouvoir ces recherches ainsi que leurs applications, le MEDD en collaboration avec l'ADEME organisent ces 2 journées d'échanges et de prospective.

Ces journées s'adressent à tous les acteurs de la gestion et de la protection des sols - décideurs publics, agriculteurs, gestionnaires, chercheurs, ... - désireux de faire entendre leur point de vue tant sur les besoins de recherche que sur la mise en place d'une politique de protection des sols en France.

PROGRAMME

21 Novembre 2006

- 9 h 00 **Allocution d'ouverture par E. VINDIMIAN (MEDD)**, chef du service de la recherche et de la Prospective, Direction des études économiques et de l'évaluation environnementale
- 9 h 15 **Allocution d'ouverture par P. SOUET (ADEME)**, Directeur adjoint de la Direction Déchets et Sols

Surveillance, dégradation physique des sols, érosion, qualité de l'eau

Thème « Surveillance des propriétés des sols » - Animateur : D. KING (INRA d'Orléans)

- 9 h 30 **Présentation du thème par l'animateur**
- 9 h 40 **Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols en milieu limoneux acide**
D. CLUZEAU (Université Rennes 1, UMR EcoBio) – Coordinateur du projet : C. WALTER (UMR INRA de Rennes/Agrocampus : Sol – Agronomie – Spatialisation)
- 9 h 50 **Dégradation physique des sols de vigne et impacts sur la ressource en eau en milieu méditerranéen viticole**
P. LAGACHERIE (INRA de Montpellier, UMR LISAH)
- 10 h 00 **Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement (DST): impact, prévision, prévention, suivi, cartographie (Programme en cours)**
G. RICHARD (INRA d'Orléans, Unité de Science du Sol)
- 10 h 10 **Présentation des avancées sur le thème par l'animateur**
- 10 h 20 **Le point de vue d'un utilisateur**
A. DELAUNOIS (Chambre d'Agriculture du Tarn)
- 10 h 30 **Discussion**

10 h 45 Pause

Thème « Erosion et qualité de l'eau » - Animateur : C. MOUVET (BRGM)

- 11 h 00 **Présentation du thème par l'animateur**
- 11 h 10 **Etude des fonctions environnementales des zones tampons en vue de la gestion et de la maîtrise des impacts d'origine agricole : application aux micro polluants**
P. BENOIT (INRA-INA PG, UMR Environnement et Grandes cultures)
- 11 h 20 **Impact de la récolte et de la régénération des peuplements sur la fertilité des sols forestiers**
J. RANGER (INRA de Nancy, Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers)
- 11 h 30 **Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés (phénomènes physiques et dispositifs d'action)**
Y. LE BISSONNAIS (INRA de Montpellier, UMR LISAH)
- 11 h 40 **La maîtrise collective par les agriculteurs du ruissellement érosif sur le territoire agricole**
V. SOUCHERE (INRA-INA PG, UMR SAD-APT)
- 11 h 50 **Présentation des avancées sur le thème par l'animateur**
- 12 h 00 **Le point de vue d'un utilisateur**
A. de la SABLONNIERE (Agence de l'eau Loire-Bretagne)
- 12 h 10 **Discussion**

12 h 30 Déjeuner

Contamination des sols

Thème « Contamination des sols par les éléments en traces et par les micro-organismes pathogènes » - Animateur : J. BERTHELIN (CNRS, UMR 7137 LIMOS, UHP Nancy 1)

- 14 h 00** **Présentation du thème par l'animateur**
- 14 h 10** **Caractérisation de la biodisponibilité des éléments métalliques en traces dans les sols et validation de méthodes de mesures fiables**
C. QUANTIN (CNRS-Université Paris Sud, UMR 8148 IDES) – Coordinateur du projet : G. ECHEVARRIA (ENSAIA-INRA, Laboratoire Sols et Environnement)
- 14 h 20** **Eléments traces métalliques dans les sols : méthodes d'évaluation spatialisée, spéciation et transferts vers les eaux souterraines et les plantes**
Y. ITARD (BRGM) – Coordinateur du projet : C. MOUVET (BRGM)
- 14 h 30** **Prise en compte de l'imperfection des connaissances dans la définition des objectifs de qualité des sols**
D. GUYONNET (BRGM, Service Environnement et Procédés)
- 14 h 40** **Pratiques pastorales et qualité microbiologique des eaux à l'échelle bassin versant: Rôle des facteurs pédoclimatiques et hydrométéorologiques dans la survie, l'état physiologique et le transfert des populations de bactéries fécales bovines (Programme en cours)**
J.M. DORIOZ (INRA de Thonon-les-Bains, Station d'hydrobiologie lacustre)
- 14 h 50** **Présentation des avancées sur le thème par l'animateur**
- 15 h 00** **Le point de vue d'un utilisateur**
J.-L. PERRIN (MEDD, Chef du bureau Pollution des Sols)
- 15 h 10** **Discussion**

15 h 25 pause

Thème « Recyclage des déchets et impact sur les sols » - Animateur : J. MASSE (Arvalis Institut du végétal, Paris)

- 15 h 40** **Présentation du thème par l'animateur**
- 15 h 50** **Impact à long terme des l'épandages de déchets en agrosystème : site expérimental de la Bouzule**
C. SCHWARTZ (ENSAIA-INRA Nancy, Laboratoire Sols et Environnement)
- 16 h 00** **Impact à long terme des l'épandages de composts de déchets, effets du compostage**
S. HOUOT (INRA de Grignon, Unité Environnement et Grandes Cultures)
- 16 h 10** **Apports de boues et déjections animales sur les sols de l'île de La Réunion dans un contexte pédogéochimique riche en éléments traces (Programme en cours)**
E. DOELSCH (CIRAD, Station de La Bretagne, Saint-Denis de La Réunion)
- 16 h 20** **Présentation des avancées sur le thème par l'animateur**
- 16 h 30** **Le point de vue d'un utilisateur**
E. BOURMEAU (Veolia propreté, Direction des Services)
- 16 h 40** **Discussion**
-
-

PROGRAMME

22 Novembre 2006

Matière organique et Biodiversité

Thème « Matière organique du sol : effet de serre et qualité des sols » - Animateur J. RANGER (INRA de Nancy, Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers)

- 9 h 00 **Présentation du thème par l'animateur**
- 9 h 10 **Déterminants des stocks de carbone des Petites Antilles. Alternative de séquestrations de carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés**
M. BERNOUX (IRD de Montpellier, Laboratoire MOST, UR 179 SeqBio)
- 9 h 20 **Impact des pratiques agricoles et sylvicoles sur les variabilités spatiales et temporelles des constituants organiques du sol et de la biomasse microbienne. Aspects méthodologiques de la surveillance, identification de compartiments fonctionnels, modélisation et généralisation spatiale**
D. ARROUAYS (INRA d'Orléans, Unité INFOSOL)
- 9 h 30 **Restauration de fonctions et de propriétés des sols de grande culture intensive. Effet de systèmes de culture alternatifs sur les matières organiques et la structure des sols limoneux – projet DMOSTRA**
C. CHENU (UMR INRA-INAPG, Grignon) – coordinatrice du projet : M. BALABANE (INRA de Versailles, Unité de Science du Sol)
- 9 h 40 **Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure des sols sous l'effet de la gestion organique des sols (Projet en cours)**
C. CHENU (UMR INRA-INA-PG, Grignon)
- 9 h 50 **Evaluation (caractérisation, quantification, potentiel) de la source racinaire de carbone pour la gestion et la modélisation des matières organiques des sols (Projet en cours)**
J. BALESSENT (INRA d'Aix-en-Provence, Unité de Géochimie des sols et des eaux)
- 10 h 00 **Evaluation et modélisation des flux de protoxyde d'azote (N₂O) d'origine agricole : mise au point d'une méthode d'évaluation des émissions à l'échelle d'une petite région agricole intégrant l'effet du type de sol et des pratiques agricoles**
C. HENAULT – Coordinateur du projet : J.C. GERMON (INRA/Université de Bourgogne, CMSE, UMR 1229 Microbiologie et Géochimie des Sols)
- 10 h 10 **Présentation des avancées sur le thème par l'animateur**
- 10 h 20 **Le point de vue d'un utilisateur**
I. FELIX (ARVALIS – Institut du végétal)
- 10 h 30 **Discussion**
-
-
- 10 h 45 pause

Thème « Effet des Pratiques culturelles sur la biodiversité » - Animatrice : L. JOCTEUR-MONROZIER (Univ. Lyon 1, UMR CNRS 5557 - USC INRA 1193 Ecologie Microbienne)

- 11 h 00 **Présentation du thème par l'animatrice**
- 11 h 10 **Développement d'un indicateur de qualité des sols basé sur la macrofaune du sol**
Essais sur un site pollué par des éléments en traces
N. RUIZ CAMACHO (IRD de Bondy, Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux) –
Coordinateur du projet : P. LAVELLE
- 11 h 20 **Effet des polluants sur le potentiel microbien, des sols : méthodes utilisables en**
routine pour l'analyse de la taille, de la biodiversité et des activités microbiennes des
sols
F. MARTIN-LAURENT (INRA-CMSE, UMR 1229 Microbiologie et Géochimie des Sols) –
Coordinateur du projet : R. CHAUSSOD
- 11 h 30 **Modifications des pratiques agricoles et impacts environnementaux: Vers un meilleur**
couplage de la dynamique des COmmunautés microbiennes du Sol, des Matières
Organiques du Sol et des FLUX de carbone et d'azote dans les sols (Projet en cours)
S. RECOUS (INRA de Laon-Reims-Mons, UR 1158 Agronomie)
- 11 h 40 **Présentation des avancées sur le thème par l'animatrice**
- 11 h 50 **Le point de vue d'un utilisateur**
E. THYBAUD (Président de la commission AFNOR T90B Biosurveillance de
l'Environnement)
- 12 h 00 **Discussion**

12 h 15 Déjeuner

Table ronde, Conclusions et Perspectives

Recherche et Décision publique pour la protection des sols

Quels nouveaux besoins de recherche pour les politiques publiques ?

14 h 00 – 17 h 45

(détails des interventions au verso)

Table ronde, Conclusions et Perspectives

Recherche et Décision publique pour la protection des sols

Quels nouveaux besoins de recherche pour les politiques publiques ?

- 14 h 00 **Introduction de la table ronde**
A. LIEUTAUD (MEDD, Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale)
- Europe**
- 14 h 10 **Les outils et les besoins nécessaires à la mise en œuvre du projet de Directive Cadre pour la Protection des sols**
C. OLAZABAL (Commission Européenne, Direction Environnement, Service Agriculture, Forêt et Sol, Bruxelles, Belgique)
- 14 h 45 **La recherche et la surveillance des sols en Europe**
L. MONTANARELLA (Commission Européenne, Centre de Recherche, Ispra, Italie)
- 15 h 00 **Discussion**
- Liens recherche et usagers**
- 15 h 20 **Pourquoi la question de la protection des sols n'émerge pas dans la société ? Quels sont les freins et quelles sont les solutions ?**
L. THIEBAUT (ENESAD –CESAER, Dijon)
- 15 h 40 **Présentation du programme d'évaluation international des services écosystémiques des sols (Millenium Ecosystem Assessment) : recyclage des nutriments par les écosystèmes**
P. LAVELLE (IRD de Bondy, Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux)
- 15 h 50 **Témoignage d'un représentant des agriculteurs**
J.M. THULLIER (agriculteur du Nord Pas-de-Calais, membre de l'association FARRE, Forum de l'Agriculture Raisonnée Respectueuse de l'Environnement)
- 16 h 00 **Témoignage d'un représentant d'une association de l'environnement France Nature Environnement**
L. VILAIN (chargé de mission agriculture durable, France Nature Environnement)
- 16 h 10 **Discussion**
- 16 h 20 **Témoignage d'un représentant des aménageurs/urbanistes**
P. POUPINOT (chargée de mission urbaniste, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme FNAU)
- 16 h 30 **Témoignage d'un représentant des Parcs Naturels**
En attente de confirmation
- 16 h 40 **Témoignage d'un représentant des propriétaires terriens**
T. DE L'ESCAILLE (membre de l'association ELO, European Land Owners)
- 16 h 50 **Discussion**
- 17 h 00 **Quels sont les projets de recherche en lien avec la gestion et la protection de la qualité des sols financés par l'ANR (Agence Nationale de Recherche) ?**
P. FREYSSINET (ANR, Département Energie Durable et Environnement)
- 17 h 10 **Comment mettre en adéquation l'enseignement de la science du sol et les besoins des décideurs publics, gestionnaires ou agriculteurs en matière de gestion et de protection des sols ?**
P. FAIVRE (Université de Chambéry, Professeur de Science du Sol, Directeur de l'UFR CISM, Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne)
- 17 h 20 **Discussion**
- 17 h 30 **Clôture des journées**
-
-

Surveillance, dégradation physique des sols, érosion, qualité de l'eau

Surveillance des propriétés des sols
Animateur : D. King

Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols en milieu limoneux acide

Coordinateur du projet :

Christian Walter

Agrocampus Rennes, UMR INRA SAS,
65 rue de St Briec - 35042 Rennes Cedex
christian.walter@agrocampus-rennes.fr

Participants :

D. Cluzeau⁽²⁾, V. Hallaire⁽¹⁾, M. Lamandé⁽¹⁾, G. Peres⁽²⁾, B. Lemercier⁽¹⁾, F. Vertès⁽¹⁾, R. Chaussod⁽³⁾, C. Henault⁽³⁾ et P. Curmi⁽¹⁾

⁽¹⁾ Agrocampus Rennes, UMR INRA SAS, 65 rue de St Briec 35042 Rennes Cedex

⁽²⁾ Université Rennes 1, UMR CNRS 6553 Ecobio, IBTM, 35042 Rennes

⁽³⁾ INRA Dijon, Laboratoire de Microbiologie, 17, Sully - BP 86510 - 21065 Dijon Cedex

Résumé

Un programme de recherche « Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols en milieu limoneux acide » a été entrepris pour identifier les principaux déterminants spatiaux de critères de qualité des sols, dans le contexte des sols limoneux acides. Les objectifs de ce programme étaient doubles :

- identifier des indicateurs potentiels de la qualité des sols dans un contexte de sols limoneux acides, en mettant l'accent sur des indicateurs physiques et macro- et microbiologiques, peu pris en compte jusque là, et qui supposent avant leur utilisation en routine, une mise au point quant à leur condition de mesure et leurs principaux déterminants ;
- analyser aux échelles locale et régionale, la variabilité spatiale de ces indicateurs pour analyser le poids respectif de facteurs de variation liés au milieu pédo-climatique ou à l'activité humaine (histoire agronomique, système de culture, itinéraire technique).

Afin de proposer des indicateurs de la qualité physique des sols, les facteurs de variation de paramètres caractéristiques de l'état structural des horizons de surface et de leur perméabilité ont été étudiés. Une analyse de la dynamique saisonnière de ces paramètres a été entreprise sur une large gamme de parcelles, de façon à prendre en compte l'effet des systèmes agricoles et du type de sol (aux échelles du versant et de la région). Une fraction de la macroporosité, **la porosité d'assemblage**, dont l'abondance est très sensible à ces facteurs de variation, apparaît être un bon indicateur à la fois du fonctionnement hydrique (transferts aux faibles potentiels) et de l'état structural, permettant d'identifier un nombre limité de processus déterminant la structure des horizons de surface sous l'action des facteurs mécaniques et biologiques.

La caractérisation des communautés lombriciennes dans les différents contextes agro-pédo-climatiques a par ailleurs confirmé le rôle **d'indicateur joué par les lombriciens**. La caractérisation du peuplement a permis de distinguer des critères originaux pertinents décrivant les communautés : le peuplement lombricien a été caractérisé i) par sa structure écologique fonctionnelle, couplant la catégorie écologique et le stade de développement de l'individu et définissant les Unités Ecologiques Fonctionnelles (UEF), et ii) par sa structure taxonomique fonctionnelle, couplant l'espèce et le stade de développement et définissant les Unités taxonomiques Fonctionnelles (UTF). Cette étude a aussi permis de mettre en évidence le lien existant entre l'abondance lombricienne et le nombre de pores observés sur un profil, confirmant ainsi **le rôle indicateur de la densité porale**.

Le couplage des indicateurs physiques et biologiques a été analysé dans un nombre limité de situations (l'horizon de surface de 3 parcelles dans un contexte pédo-climatique). Ce couplage a permis d'aboutir à une meilleure compréhension des processus d'évolution de la structure du sol : lorsque certains lombriciens sont présents, pour une même porosité totale, la porosité fonctionnelle est plus importante et la perméabilité est plus forte. L'analyse de l'état du peuplement lombricien couplé à l'analyse macromorphologique de la structure permet donc un meilleur diagnostic de la qualité du sol.

La variabilité spatiale des paramètres physiques et biologiques a été analysée à plusieurs niveaux (intra-parcellaire, échelle du versant, échelle régionale). Les critères microbiologiques (abondance et biomasse, espèces ou UTF), les paramètres structuraux (répartition de la porosité) et hydriques (transferts aux faibles potentiels) rendent compte de la variabilité au sein d'une parcelle ou d'un versant, en liaison avec les gradients d'hydromorphie. A l'échelle régionale, toutes les variables analysées rendent compte des gradients de teneur organique.

La qualité biologique des sols a également été appréhendée par la caractérisation au laboratoire de compartiments et d'activités biologiques, liés à la fertilité (biomasse microbienne, pool de matières organiques labiles, minéralisation du carbone et de l'azote, etc.) et aux externalités (activités de dénitrification et potentialités des sols à émettre N₂O). Ces paramètres biologiques se sont avérés opérationnels et discriminants vis à vis des types de sol, du système de culture (monoculture, rotation, prairie) et des pratiques culturales (fertilisation minérale ou organique) étudiés. Néanmoins, ils sont soumis à de nombreuses sources de variation et l'interprétation et l'utilisation de telles mesures, nécessaires dans le cadre d'un observatoire de la qualité des sols, doit se faire au vu des caractérisations physico-chimiques des mêmes sols.

Un jeu partiel d'indicateurs physiques et microbiologiques, disponibles en début d'étude, a par ailleurs été acquis sur un ensemble de parcelles agricoles suivies depuis 30 ans dans le cadre de l'Observatoire Lisier du Finistère. La comparaison des différentes situations a **permis d'analyser l'influence du milieu (identifié par la texture des sols) et de la fertilisation organique (lisier) sur ces indicateurs potentiels de la qualité des sols**. Après 30 ans d'épandages massifs de lisier, l'effet du milieu est encore prépondérant sur les indicateurs concernant le fond géochimique, ainsi que les indicateurs physiques et biologiques. L'historique d'épandage détermine par contre les teneurs en éléments chimiques peu mobiles s'accumulant en proportion des apports d'effluents organiques. La persistance d'un tel effet « milieu » et l'accumulation progressive de phosphore, de cuivre et de zinc dans les sols montrent que la qualité d'un sol doit être évaluée en intégrant à la fois le contexte physique et l'histoire agronomique.

Enfin, une approche de modélisation spatio-temporelle des teneurs en carbone et en phosphore des sols a été développée permettant de simuler leur variation sur plusieurs décennies à l'échelle d'un paysage agricole, en ayant la possibilité de modifier les scénarios d'occupation et de gestion des sols. Cette approche combine une modélisation déterministe permettant de tenir compte de déterminants connus des teneurs (hydromorphie) et une modélisation stochastique visant à restituer des structures spatiales connues, mais dont les processus sous-jacents sont complexes. Le concept de pédopaysage virtuel, présentant des structures topographiques, pédologiques et de parcellaire, analogues à celles observées dans le contexte de sols limoneux acides du Massif armoricain, est proposé et son intérêt pour évaluer des réseaux de surveillance de la qualité des sols est illustré.

Ce programme propose donc un ensemble complémentaire de résultats portant sur les échelles spatiales et temporelles sous-jacentes aux processus et à leurs indicateurs, ainsi que sur la modélisation couplant la variabilité spatiale et temporelle. L'intégration de ces différents aspects reste en partie à faire ; néanmoins les nombreuses pistes ouvertes permettent d'envisager une analyse plus globale de la qualité des sols, intégrant les composantes biologiques et physiques.

Publications

Thèses

Lamandé M. 2003. Effets de l'interaction des pratiques culturales et des communautés lombriciennes sur la structure du sol et son fonctionnement hydrique. Thèse de doctorat de l'ENSA de Rennes. INRA-Agrocampus UMR Sol Agronomie Spatialisation Rennes-Quimper. 119 p.

Peres G. 2003. Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol". ECOBIO, Université de Rennes 1. <http://www.caren.univ-rennes1.fr/doc/memoires/mem7/PERES.htm>

Publications

Bastardie F., Cannavacciuolo M., Capowiez Y., De Dreuzy J-R., Bellido A. & Cluzeau D., 2002 - A new simulation for modelling the topology of earthworm burrows system and their effects on macropore flow in experimental soils. *Biol. Fertil. Soils*, 36 : 161-169.

- Cluzeau D., Blanchard E., Peres G., Ablain F., Cuendet G., Fayolle L., Lavelle P. 2005. Faune du sol et Lombriciens dans les sols tempérés agricoles. In : M.C. Girard, C. Walter, J.C. Rémy, J. Berthelin, J.L. Morel (Eds). Sols et Environnement – Cours, exercices et études de cas. Paris, Dunod. p 386-407. <http://www.inra.fr/internet/Hebergement/afes/Ressources/ouvragedunod/>
- Jegou D., Schrader S., Diestel H. & Cluzeau D., 2001 - Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms - *Applied Soil Ecology*, 17 :165-174.
- Lamande M., Hallaire V., Curmi P., Peres G., Cluzeau D. 2003. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena*, 54(3), 637-649.
- Lamande M., Peres G., Hallaire V., Curmi P., Cluzeau D. 2004. Morphologie porale, conductivité hydraulique et communautés lombriciennes suivant trois systèmes de culture. *Etude et Gestion des sols*, 11(4), 393-402.
- Pérès G., Cluzeau D., Bellido A., Marmonier P. & Curmi P. - Foraging behaviour of earthworms related to different agricultural practices. *European Journal of Soil Biology* (accepté pour publication).
- Walter, C., Chaussod R., Cluzeau, D., Curmi, P., Hallaire, V. 2002 – Caractérisation, déterminisme et surveillance de la qualité des sols milieu limoneux acide. Programme de recherche GESSOL, Fonctions environnementales des sols, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 177 p. <http://www.rennes.inra.fr/umrsas/docpdf/R8-2002-rapportgessol1-walteretal.pdf>
- Walter, C.; Viscarra Rossel, R.A.; McBratney, A. 2003 - Spatio-temporal simulation of the field-scale evolution of organic carbon over the landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* : 67 (5), p.1477-1486

Articles de vulgarisation

- Cluzeau D.**, Peres G., Decaens T., Bureau F., Grandin V. & Giteau J.L., 2003 – Caractérisation microbiologique des sols agricoles tempérés : évaluation des lombriciens et de leurs activités. *COMIFER-GEMAS*, p145-155
- Peres G, Prat P., Hardy Y., Riviere J.M., Suire M. & **Cluzeau D.**, 2003 – Les méthodes de diagnostics agro-pédologiques. Complémentarité de l'approche "Hérody" et des approches classiques. Cas du contexte pédo-climatique breton. 2^{ème} Edition. *Les Cahiers du Bioger*, Vol 1/2003, 157 p.
- Thomas F., **Cluzeau D.** & Peres G., 2004 - Les vers de terre : les acteurs de la fertilité des sols. *TCS*, n°27, pp. 10-21.

Dégradation des sols de vignes et impacts sur la ressource en eau en milieu méditerranéen viticole

Coordinateur du projet :

Philippe Lagacherie

UMR LISAH (Laboratoire d'étude des interactions Sols-Agrosystèmes, Hydrosystèmes) AGROM INRA
IRD, Campus de la Gaillarde, 2 pl. Viala, 34060 Montpellier
lagache@ensam.inra.fr

Participants :

Patrick Andrieux⁽¹⁾, Anne Biarnes⁽¹⁾, Hubert Boizard⁽²⁾, Guillaume Coulouma⁽¹⁾, Isabelle Cousin⁽³⁾, Nathalie Goma-Fortin⁽⁴⁾, Yves Le Bissonnais⁽¹⁾, Pascal Monestiez⁽⁵⁾, Guy Richard⁽³⁾, J.M. Robbez-Masson⁽¹⁾, William Trambouze⁽⁴⁾

⁽¹⁾ UMR LISAH (Laboratoire d'étude des interactions Sols-Agrosystèmes, Hydrosystèmes) AGROM INRA
IRD, Campus de la Gaillarde, 2 pl. Viala, 34060 Montpellier

⁽²⁾ Unité INRA d'Agronomie de Laon-Péronne, Rue Fernand Christ 02007 Laon cedex

⁽³⁾ Unité de Science du Sol INRA, Avenue de la Pomme de Pin – Ardon BP 20619 45166 Olivet cedex

⁽⁴⁾ Chambre d'Agriculture de l'Hérault, BP 83 Allée général Montagne 34120 PEZENAS

⁽⁵⁾ Unité INRA « biométrie statistique et modélisation spatiales » Domaine Saint-Paul - Site Agroparc
84914 Avignon cedex 9

Résumé :

Face à l'évolution profonde des systèmes de cultures viticoles au cours de ces trente dernières années, le présent projet de recherche visait à établir un diagnostic concernant l'état physique des sols viticoles méditerranéens et à étudier les conséquences de cet état sur la durabilité des systèmes viticoles en place. Les questions posées au début du projet étaient les suivantes :

- Quelle est l'intensité effective des dégradations physiques subies par les sols viticoles?
- Quelles sont les conséquences réelles de ces dégradations sur les fonctions agro-environnementales de ces sols ?
- Quelle est l'extension spatiale des dégradations observées ?
- Quelles sont les pratiques culturales, les sols, voire les conditions climatiques favorisant l'apparition de ces dégradations ?

Deux types de dégradation, liées aux pratiques viticoles, ont retenu notre attention :

- Modification des propriétés physiques des horizons de surfaces (0-20 cm) entraînant une réduction de l'infiltrabilité.
- Présence, au dessous de 20 cm de profondeur, de zones compactées, de discontinuités horizontales peu colonisables par les racines

En prenant comme exemple de région viticole méditerranéenne, la plaine de l'Orb-Hérault (1 470 km²), nous avons mis en place un site atelier pour répondre aux objectifs de notre projet. Ce site atelier se veut une préfiguration de sites ateliers constitutifs d'un réseau national ayant une fonction d'observatoire pour les recherches sur les qualités des sols et le développement de méthodes de pour leur surveillance opérationnelle.

En premier lieu, un site atelier doit reposer sur une connaissance fine du milieu étudié, tant dans sa dimension naturelle qu'anthropique. Pour ce qui concerne la première, nous avons considéré que les cartographies pédologiques réalisées à différentes échelles sur la plaine de l'Orb-Hérault constituaient une base de connaissance suffisante. Nous avons donc basé nos études sur une typologie locale des sols issue de ces travaux. Par contre, pour ce qui concerne la dimension anthropique, nous avons entrepris, en préalable à notre étude, une caractérisation détaillée des itinéraires techniques et pratiques viticoles de la région étudiée. Ces travaux, centrés dans un premier temps sur les pratiques d'entretien du

sol, ont permis de montrer la diversité importante des itinéraires techniques pratiqués sur la région étudiée ainsi que leur évolution rapide au cours de la période correspondant au projet. Ils ont également montré que les caractéristiques parcellaires, notamment celles d'écartement des inter-rangs, et les caractéristiques des exploitations agricoles sont en partie explicatives de cette diversité. Mais ils soulèvent également la question de l'existence et du poids éventuel d'un autre niveau de déterminant lié à l'environnement socioprofessionnel de l'exploitant qui devra être étudié de façon plus approfondie dans l'avenir. Par ailleurs, cette première étude des systèmes viticoles devra être étendue à d'autres pratiques, notamment aux pratiques de préparation du sol avant plantation dont l'importance a été révélée dans ce projet (voir ci-dessous).

La typologie d'itinéraires techniques et de pratiques culturales résultant de ces travaux a été utilisée avec la typologie des sols locale pour prendre en compte, dans les travaux suivants, la diversité des situations de la région étudiée.

Un site atelier doit également comporter des parcelles expérimentales où peuvent être acquises, sous conditions contrôlées, les références qui font défaut pour étudier le phénomène considéré. Ainsi, dans le cadre de ce projet, deux parcelles expérimentales ont été mises en place et suivies :

- la parcelle expérimentale de Régimont où nous avons étudié la capacité de tassement des opérations culturales de préparation du sol avant plantation, dont les modalités et outils n'ont pas d'équivalent ailleurs
- la parcelle expérimentale de Puisserguier où nous avons étudié les conséquences en terme d'infiltrabilité des sols, de ruissellement et d'érosion des différentes organisations structurales de surface générées par quatre des itinéraires techniques d'entretien du sol les plus couramment pratiqués sur la région.

Ces parcelles expérimentales sont également l'occasion de mettre au point des méthodes d'observation et de mesure qui seront utilisées sur de plus larges superficies. C'est ainsi que nous avons utilisé la parcelle de Régimont pour adapter au milieu viticole une méthode de caractérisation des tassements des sols alliant observation du profil cultural, traitement d'image et mesure de densité apparente.

Cependant, les parcelles expérimentales ne sauraient représenter la diversité des situations d'une région. C'est pourquoi un site atelier doit pouvoir s'appuyer également sur un réseau de sites de référence. Dans le cadre de ce projet, trois réseaux de ce type ont été ainsi mis en place :

- un réseau de 86 sites répartis sur 31 parcelles pour caractériser la diversité des organisations spatiales de surface,
- un réseau de 29 sites répartis sur 18 parcelles pour évaluer le niveau de tassement des sols viticoles, en rechercher les origines et les situations les plus exposées,
- un réseau de 96 sites répartis sur 32 parcelles pour étudier l'importance et la structure spatiale des phénomènes de dépérissement. Sur ce réseau, nous avons également mis au point la méthode de caractérisation des dépérissements sur le terrain.

Chacun de ces réseaux a été constitué en raisonnant l'échantillonnage de manière à couvrir une diversité maximale, représentative de la région étudiée, avec un nombre de sites le plus limité possible. Pour cela, nous avons largement utilisé les typologies de sol et d'itinéraires techniques disponibles sur la région d'étude. Nous avons préféré distinguer des réseaux de sites de référence distincts par sujet d'étude afin de ne pas multiplier les contraintes d'échantillonnage. Notons cependant que ces sites sont en majorité localisés dans un même périmètre, la basse vallée de la Peyne, qui joue ainsi le rôle de secteur de référence.

Enfin, un site atelier doit s'appuyer sur des cartographies exhaustives des phénomènes étudiés ainsi que de leurs causes et effets potentiels afin de surveiller leur extension spatiale. Dans cette perspective, nous avons développé des méthodes de cartographie des organisations structurales de surface et des mortalités de vigne, une des conséquences supposées des tassements des sols, à partir d'images de télédétection à haute résolution. A partir de ces cartographies, il est aussi possible d'élaborer de nouveaux faits expérimentaux en mettant en relation, grâce à des analyses spatiales appropriées, causes et conséquences potentielles. Pour illustrer les potentialités de telles approches, nous avons étudié les relations spatiales entre mortalité des vignes et une série de facteurs intervenant potentiellement dans la dégradation physique des sols. La structure spatiale des mortalités ainsi que celle des facteurs de mortalité non encore identifiés ont été également déterminées par des méthodes géostatistiques, offrant une possibilité supplémentaire d'identification de ces facteurs.

La constitution d'un site atelier sur la région « plaine viticole de l'Orb-Hérault » est donc le premier acquis, méthodologique, de ce projet. Ce site atelier pourra être utilisé dans l'avenir par les professionnels locaux

de la filière viticole pour approfondir, élargir et actualiser le diagnostic sur l'état physique des sols viticoles. Il peut également servir d'exemple pour de nouveaux sites ateliers à développer pour étudier d'autres problèmes de qualité des sols nécessitant d'être surveillés sur d'autres régions.

Sur un plan cognitif, les travaux de recherche menés dans le cadre de ce projet nous ont permis d'obtenir des connaissances nouvelles concernant l'état physique des sols viticoles et leur évolution. Nous présentons ci-après ces résultats en distinguant les deux types de dégradations structurales envisagées au départ du projet.

Pour ce qui concerne les organisations structurales de surface, les travaux de recherche antérieurs au projet avaient montré leur caractère généralisé ainsi que l'impact de certains itinéraires techniques d'entretien du sol (désherbage chimique vs désherbage mécanique). Ces travaux avaient également permis d'élaborer une typologie des organisations structurales de surface permettant d'estimer les infiltrabilités des sols. Les principaux acquis de ce projet sont les suivants :

- l'application de la typologie existante des organisations structurales sur le réseau de 86 sites de référence a permis de démontrer que cette typologie était valide pour une gamme plus large de sols et d'itinéraires techniques. Quelques mesures supplémentaires d'infiltrabilité des sols seront nécessaires pour préciser les gammes d'infiltrabilité sur certains types, en particulier pour ceux où de nouveaux traits morphologiques apparaissent (ex : litières de nature différente).
- un premier modèle d'évolution temporelle des organisations structurales de surface dans le cas d'itinéraires techniques incluant un travail du sol a été proposé sur la base des suivis réalisés sur la parcelle de Puisserguier et des caractérisations sur le réseau de site de référence. Ce modèle préfigure un modèle plus complet qui permettra de prédire la distribution spatiale et l'évolution temporelle des organisations structurales de surface à partir de la connaissance des itinéraires techniques d'entretien du sol, des conditions climatiques et des propriétés du sol. A ce dernier titre, nous avons vérifié que des mesures de stabilité structurale des sols pouvaient constituer une source de données pertinente pour ce modèle.
- Les suivis réalisés sur la parcelle expérimentale ont montré l'impact des itinéraires techniques d'entretien du sol sur l'infiltrabilité du sol, le ruissellement et l'érosion, au travers des organisations structurales différenciées qu'ils génèrent. Les contrastes les plus importants sont observés entre les itinéraires techniques « désherbage chimique intégral » (peu infiltrant, fortement ruisselant et érosifs) et « enherbement naturel maîtrisé par un travail du sol » (infiltrant, faiblement ruisselant et peu érosif), les itinéraires techniques « enherbement naturel maîtrisé par le glyphosate » et « engazonnement » occupant des positions intermédiaires. Ces premiers résultats méritent d'être confirmés sur une période plus longue afin de tenir compte de la forte variabilité climatique inter-annuelle en climat méditerranéen et de permettre une meilleure installation de l'engazonnement et une stabilisation de ses effets.

Pour ce qui concerne les tassements des sols viticoles, il n'existait, en début de projet, aucune référence permettant de quantifier l'importance du phénomène. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet se résument de la façon suivante :

- les niveaux moyens de tassement des sols observés sur le réseau de 29 sites de référence restent modérés (22% du profil cultivé) avec cependant quelques cas de tassement importants
- Parmi les origines possibles de ces tassements, ce sont les opérations culturales de préparation du sol avant plantation qui s'avèrent les plus préoccupantes. Nous avons ainsi pu reproduire sur la parcelle de Régimont des niveaux de tassements élevés (jusqu'à 60 % du sol cultivé) par labour profond en conditions de sol humide. Ces types de tassement ont été ensuite largement reconnus sur le réseau de sites de référence (40% de l'ensemble des tassements), spécifiquement impliqués dans les situations fortement tassées. Bien que quantitativement plus importants, les tassements issus d'opérations culturales d'entretien du sol et de la vigne (circulation d'engins pour le désherbage, les traitements phyto-sanitaire et les vendanges) s'avèrent moins préoccupants du fait qu'ils sont distribués de façon plus homogène selon les sites (tassements toujours présents mais jamais excessif) et qu'ils concernent des zones du sol cultivé a priori moins densément colonisables par les racines.
- L'analyse de la diversité des situations révélées par le réseau de sites de référence fait ressortir des contrastes entre certains types de sol et types d'itinéraires techniques. Ainsi, les colluviosols rédoxiques, plus fréquemment concernés par des conditions de sol humide, semblent plus affectés par les tassements liés aux opérations culturales avant plantation. En revanche, sur les sites où un

enherbement est pratiqué, les niveaux de tassement sont plus limités, cependant cet effet n'intéresse que les tassements liés aux circulations d'engins.

Nous n'avons pas pu observer, sur parcelle expérimentale, les conséquences directes de ces tassements sur la production de la vigne, celles-ci n'intervenant que sur le moyen ou le long terme (cycle culturel de la vigne). Il est ainsi encore difficile d'évaluer précisément l'impact de ces tassements sur les phénomènes de dépérissement qui ont amené la profession viticole à s'interroger sur la pérennité des systèmes viticoles actuels. Nous avons néanmoins réuni dans ce projet un ensemble d'éléments convergents :

- l'effet dépressur des tassements sur l'enracinement a été mis en évidence à partir de comptages racinaires effectués sur quatre sites de référence.
- Sur trois des cinq situations de vigne dépérissantes étudiées, nous avons mis en évidence des niveaux de tassements très élevés par rapport aux niveaux enregistrés sur le réseau de sites de référence, ces tassements étant principalement liés aux opérations culturales avant plantation.
- Les analyses spatiales mettant en relation, à différentes échelles, les cartographies de dépérissements et ses facteurs potentiels ont révélé des dépérissements significativement plus élevés sur les sols les plus aptes aux tassements par les opérations culturales avant plantation (colluviosols redoxiques). L'analyse spatiale a par ailleurs révélé la prépondérance d'un facteur expliqué par aucun élément du milieu naturel connu, mais dont la structure spatiale peut correspondre à celle résultant d'un événement aléatoire intervenant à l'échelle parcellaire.

Ainsi, il est plausible que les labours profonds effectués en conditions de sol humide soient en cause, au moins partiellement, dans les dépérissements sans cause pathologique apparente observés sur le vignoble languedocien. Pour confirmer cette hypothèse, il conviendrait de multiplier les observations en situation de vigne dépérissante. La méthode d'évaluation des tassements mise au point dans ce projet constitue pour cela un outil approprié.

Dégradation physique des Sols agricoles et forestiers liée au Tassement (DST) : impact, prévision, prévention, suivi, cartographie

(Projet en cours)

Coordinateur du projet :

Guy Richard

INRA d'Orléans, Unité de Science du Sol
2163, avenue de la Pomme de Pin, BP 20619 Ardon – 45166 Olivet
Guy.Richard@orleans.inra.fr

Participants :

J. Labreuche⁽¹⁾, S. Debuissou⁽²⁾, Y.J. Cui⁽³⁾, V. Degennaro⁽³⁾, P. Delage⁽³⁾, N. Brisson⁽⁴⁾, H. Boizard⁽⁵⁾, P. Defosse⁽⁵⁾, J. Leonard⁽⁵⁾, B. Mary⁽⁵⁾, F. Gerard⁽⁶⁾, Y. Lefevre⁽⁶⁾, J. Ranger⁽⁶⁾, D. Arrouays⁽⁷⁾, C. Le Bas⁽⁷⁾, I. Cousin⁽⁸⁾, D. Tessier⁽⁹⁾, E. Leveque⁽¹⁰⁾, A. Brethes⁽¹¹⁾, J. Roger-Estrade⁽¹²⁾, A. Chanzy⁽¹³⁾, P.A. Jayet⁽¹⁴⁾, Y. Capowicz⁽¹⁵⁾, P. Cosenza⁽¹⁶⁾, A. Tabbagh⁽¹⁶⁾, J. Tabbagh⁽¹⁶⁾, F. Leveque⁽¹⁷⁾

⁽¹⁾ Arvalis – Institut du végétal, Boigneville

⁽²⁾ CIVC, Epernay

⁽³⁾ ENPC CERMES, Marne La Vallée

⁽⁴⁾ INRA AgroClim Avignon

⁽⁵⁾ INRA Agronomie Laon-Reims-Mons

⁽⁶⁾ INRA BEF Nancy

⁽⁷⁾ INRA, Unité INFOSOL, Orléans

⁽⁸⁾ INRA Science du Sol, Orléans

⁽⁹⁾ INRA Science du Sol, Versailles

⁽¹⁰⁾ ITB, Paris

⁽¹¹⁾ ONF, Paris

⁽¹²⁾ UMR Agronomie Grignon

⁽¹³⁾ UMR CSE, Avignon

⁽¹⁴⁾ URM Economie Publique, Grignon

⁽¹⁵⁾ UMR LTE, Avignon

⁽¹⁶⁾ UMR SISYPHE, Université Paris VI

⁽¹⁷⁾ Université de La Rochelle

Résumé

La préservation des ressources naturelles est l'un des domaines de recherche en lien avec la problématique du développement durable. Parmi ces ressources, le sol occupe une position particulière de par ses fonctions à la fois agronomiques (produire en quantité et qualité) et environnementales (épurer l'air en stockant du Carbone, épurer l'eau en dégradant des pesticides, recycler des déchets, ...). Ressource non renouvelable à l'échelle humaine, de nombreuses questions se posent aujourd'hui quant à l'évolution des sols et à leur possible dégradation en fonction de leur utilisation et des changements climatiques à venir. Le tassement est une des causes possibles de cette dégradation des sols (cf. le projet de directive européenne la protection des sols). Le tassement est lié à la mécanisation des activités agricoles et forestières, il résulte des multiples passages d'engins agricoles et forestiers. En réduisant les capacités d'aération et d'infiltration des sols, en limitant l'enracinement des cultures, le tassement affecte nombre des fonctions agronomiques et environnementales des sols. A ce titre, il est une forte préoccupation des acteurs en agriculture, forêt et environnement. En effet, le tassement concerne désormais aussi bien les sols cultivés que les sols forestiers.

De nombreuses questions subsistent concernant l'ampleur de cette dégradation en fonction de la nature des sols et de leur occupation, l'évaluation de ses conséquences agri-environnementales, la quantification de son impact économique, son évolution en fonction des changements de climat et de pratiques, sa

remédiation naturelle. Le projet DST propose une action de recherche sur le tassement des sols agricoles et forestiers français visant à mobiliser l'ensemble des connaissances actuelles et à développer de nouvelles voies de recherche pour contribuer à :

- quantifier les impacts du tassement sur les fonctions environnementales du sol ;
- quantifier les conséquences économiques des tassements, évaluer l'impact d'éventuelles mesures de protection des sols ;
- identifier les conditions, actuelles et à venir, de l'utilisation des sols conduisant à des problèmes de tassement des sols ;
- établir une cartographie des risques de tassement des sols français.

Le projet DST est structuré en cinq volets de recherche : impact, prévision, prévention, suivi et cartographie. Il repose sur l'utilisation des modèles de tassement des sols et de fonctionnement du système sol/plante pour étudier l'occurrence du tassement et ses impacts sur les cultures et l'environnement via la modification des propriétés physiques des sols (propriétés de stockage et de transfert, propriétés mécaniques). Il cherche à développer de nouvelles méthodes non destructives de suivi de l'état du sol pour évaluer la vitesse de régénération de la porosité des sols tassés. Le projet couvre les sols agricoles et forestiers. C'est un projet transversal qui associe des laboratoires de recherche travaillant en agriculture, en géophysique ou en génie civil, et des organismes professionnels en charge des grandes cultures, de la vigne ou de la forêt. Il s'appuie sur une expérience de terrain acquise dans des conditions très variées. La synthèse des résultats acquis durant le projet doit aboutir à une cartographie des zones sensibles au tassement en France.

Le projet DST a débuté en juin 2005. Ses premiers résultats concernent (1) la définition des scénarios de simulation de l'impact des tassements sur l'environnement (lessivage du nitrate, émissions de N₂O, érosion), (2) la réalisation de simulations à l'aide des modèles STICS, KINEROS et AROPAj, (3) la cartographie des contraintes moyennes exercées à la surface du sol lors des passages d'engins agricoles à l'échelle nationale, (4) la mise au point d'un protocole de détermination des propriétés mécaniques de sols, (5) l'évaluation du poids des différentes sources d'incertitude sur les données d'entrée d'un modèle de transfert d'eau appliquée à la prévision des jours disponibles, (6) le repérage des volumes de sol tassés à partir de mesures électriques ou magnétiques et enfin (7), l'identification de deux sites d'étude de l'impact des tassements en sols forestiers.

Les qualités des sols

L'expérience de la Chambre d' Agriculture du Tarn

Antoine Delaunois

Chambre d'Agriculture du Tarn, BP 89 - 81003 Albi cedex
a.delaunois@tarn.chambagri.fr

Depuis la réforme de la PAC de 1992 notamment, de nouvelles approches sur le sol se sont développées dans le Tarn et dans la région Midi-Pyrénées. Des mesures agri-environnementales ont été mises en place, en particulier, pour la qualité des eaux et la lutte contre l'érosion. Pour y répondre au mieux, un groupe de travail sur l'érosion a été mis en place, animé par la Chambre Régionale d' Agriculture de Midi-Pyrénées.

Dans le Tarn, une approche globale, basée principalement sur 43 diagnostics d'exploitation, a montré que les causes de l'érosion sont multiples et que les agriculteurs ont déjà testé et pratiqué de nombreuses solutions. Parmi celles-ci, le non-labour est apparu comme la technique la plus intéressante au niveau des exploitations agricoles (2)(3). Ceci s'explique en particulier par le développement systématique de la biomasse lombricienne, les galeries de vers de terre pouvant évacuer jusqu'à 320 mm/h selon des expérimentations réalisées par Bouché (1). Revel et Rouaud (4) ont montré que dans les coteaux du Lauraguais, le labour est la première source de perte de sol (perte de 1,07 mètres de sol en moyenne sur 58 % de la surface du bassin versant de Vermeil, perte due essentiellement au labour).

Le non-labour permet de réduire ou d'arrêter l'érosion hydrique et mécanique, de protéger le patrimoine sol de l'agriculteur, de réduire les coûts, d'améliorer les qualités des sols (notamment les propriétés biologiques et physiques), et de pratiquer une agriculture plus durable. La Chambre d' Agriculture a donc décidé de promouvoir ces pratiques, avec l'appui, notamment, de l' Agence de l' Eau Adour-Garonne et du Groupe Régional Non-labour créé en 1998.

Actuellement, environ 20 % des agriculteurs du Tarn pratiquent le **non-labour fixe** (définitif). Lors d'une enquête auprès des 532 agriculteurs du Tarn ayant contractualisés la mesure non-labour dans les CTE (Contrats Territoriaux d' Exploitation), 99 % se sont déclarés plutôt satisfaits de ces nouvelles pratiques agronomiques, et 95 % vouloir les poursuivre à la fin du contrat de 5 ans.

Cependant, le non-labour fixe présente encore beaucoup de contraintes pour les agriculteurs, ce qui freine son développement. Ces contraintes peuvent être très fortes. Ce sont le poids des habitudes (qui sont millénaires), une exigence élevée de technicité, un risque économique, un gain économique potentiel jugé insuffisant, une image souvent négative (absence de consensus technique), un soutien public insuffisant (le non-labour n'est pas pris en compte dans les mesures de lutte contre l'érosion du Plan Végétal Environnement de 2006 (Fond européen FEADER)), une nouvelle agronomie à inventer (biodiversité, auxiliaires, ...), la nécessité de rotations équilibrées, l'achat de nouveaux matériels pour le travail du sol,

D'autres techniques ont aussi des effets notables sur la qualité des sols. Les petits labours (profondeur 15/20 cm), ou les très petits labours ($P < 10$ cm) sont intéressants à développer. Les compactages sont à limiter au maximum. Les couverts végétaux (cultures intermédiaires) ont des effets excellents. La rotation est essentielle. Un bon choix des phytosanitaires est important pour favoriser la vie du sol. Les apports organiques sont à gérer notamment en fonction des équilibres entre C et N. Des apports excessifs de fertilisants sont à éviter, notamment de P et K,

Ces différents thèmes intéressent de plus en plus les agriculteurs, **le sol étant un des piliers de l'agriculture durable**. Dans différentes enquêtes ponctuelles réalisées auprès d' agriculteurs de la région, les objectifs pour la gestion des sols étaient : améliorer la qualité des produits (viticulteurs), améliorer le patrimoine sol (79 % des réponses), diminuer les charges (72 %), obtenir des rendements optimum (55 %), préserver l'environnement (54 %), améliorer la santé des animaux (éleveurs).

(1) - Al Addan F., Aliaga R., Bouché M.B, 1991 - Relation entre peuplements lombriciens et propriétés physico-chimiques de sols méditerranéens. C. R. X Coll. int. zool. sol, Bangalore, Inde.

(2) - Delaunois A., 2002 - L'érosion hydrique : un signe de la dégradation biologique des sols dans le sud-ouest de la France. AFES, Journées Nationales de l'Etude des Sols, 22-24 octobre 2002, Orléans, pp. 123-125, 33 diapositives.

(3) - Delaunois A., Bruno J.F., Costes J.L., Longueval C., Revel J.C., 2004 - Le non-labour lutte contre l'érosion. Perspectives agricoles, mai 2004, pp 60-63. Disponible sur le site www.agritarn.com

(4) - Revel J.C. et Rouaud M., 1985 - Mécanismes et importance des remaniements dans le Terrefort toulousain (Bassin Aquitain, France). Pédologie, Gand, XXXV, 2, p. 171-189.

Surveillance, dégradation physique des sols, érosion, qualité de l'eau

Erosion et qualité de l'eau
Animateur : C. Mouvet

Etude des fonctions environnementales des zones tampon en vue de la gestion et de la maîtrise des impacts d'origine agricole : application aux micro-polluants organiques

Coordinateur du projet :

Pierre Benoit

INRA-INAPG, UMR Environnement et Grandes Cultures, 78850 Grignon

benoit@grignon.inra.fr

Participants :

E. Barriuso⁽¹⁾, L.M. Bresson⁽¹⁾, N. Carluer⁽²⁾, Y. Coquet⁽¹⁾, A. Dutertre⁽³⁾, V. Etievant⁽¹⁾, C. Garon-Boucher⁽²⁾, J.P. Gillet⁽³⁾, V. Gouy⁽²⁾, J.J. Gril⁽²⁾, C. Labat⁽¹⁾, B. Laillet⁽²⁾, F. Liaudet⁽²⁾, I. Madrigal⁽¹⁾, M. Moquet⁽³⁾, C. Souiller⁽²⁾, B. Réal⁽³⁾, J. Toccanier⁽²⁾, V. Pot⁽¹⁾, P. Vachier⁽¹⁾.

⁽¹⁾ INRA-INAPG, UMR Environnement et Grandes Cultures, 78850 Grignon

⁽²⁾ CEMAGREF, Unité Qualité des Eaux et Prévention des Pollutions, 69336 Lyon

⁽³⁾ ARVALIS, Institut du Végétal, 80200 Estrées-Mons

Résumé

Ce projet avait pour objectif d'étudier le fonctionnement physique, chimique et biologique de dispositifs enherbés et boisés avec l'ambition d'élaborer des indicateurs de potentialité d'épuration pour leur utilisation dans la gestion et la maîtrise des impacts des polluants d'origine agricole. La phase principale a consisté en l'acquisition de résultats expérimentaux tant sur le terrain qu'en laboratoire afin d'atteindre les quatre objectifs suivants :

- La caractérisation pertinente du fonctionnement hydraulique à l'aide de paramètres hydrodynamiques accessibles expérimentalement.
- L'évaluation des phénomènes de rétention de polluants et de leur réversibilité au niveau des profils des dispositifs enherbés.
- L'évaluation du rôle de la matière organique d'origine herbacée ou ligneuse sur le comportement hydraulique des couches de surface et sur la dynamique globale des polluants.
- La caractérisation de l'activité biologique des dispositifs, activité globale et spécifique intéressant la dégradation des polluants.

Sur le site principal de l'étude (Site Arvalis de la Jaillière) nous présentons un ensemble de résultats complémentaires, portant sur le fonctionnement des dispositifs enherbés et dans une moindre mesure sur les dispositifs boisés, ceux-ci n'ayant pas été étudiés par simulation de ruissellement. La confrontation de nos résultats avec des études menées sur ces mêmes sites sur des dispositifs fixes (Réal, 1998) confirme que l'**infiltration** des pesticides présents initialement dans le ruissellement est quantitativement le phénomène majeur expliquant l'efficacité des dispositifs enherbés. Le volet du programme consacré au fonctionnement hydraulique de ces dispositifs indique pour le site de la Jaillière des capacités d'infiltration très élevées dans les conditions expérimentales des simulations de ruissellement. Cet outil a fourni des jeux de données sur les flux d'eau et de produits phytosanitaires dans des conditions permettant de tester l'efficacité d'interception des dispositifs dans leurs limites : débits élevés, durées des épisodes de ruissellement prolongées. En outre ces expérimentations ont permis de mettre en évidence une variabilité saisonnière des capacités d'infiltration dépendant essentiellement de l'état hydrique du sol. Des conditions plus saturées en hiver limitent les quantités infiltrées et diminuent la dissipation au travers du dispositif.

Concernant le devenir exact du flux de produits phytosanitaires infiltrés, les résultats montrent un potentiel de **rétention** accru dans les horizons de surface des sols enherbés. Ce potentiel de rétention est beaucoup plus fort pour le diflufenicanil que pour l'isoproturon. Ceci rejoint les résultats de simulation de ruissellement montrant une plus forte rétention du diflufenicanil lors de la circulation de l'eau à travers les dispositifs enherbés (Souiller *et al.*, 2002). Des résultats obtenus en colonnes de sol indiquent que l'efficacité de la rétention dans les horizons superficiels des dispositifs enherbés dépend en premier lieu des vitesses de transfert à travers les sols enherbés et en particulier du temps de contact avec les horizons superficiels (Benoit *et al.*, 2000). La possibilité d'écoulements préférentiels verticaux est

suggérée par les résultats d'infiltration au voisinage de la saturation (Pot *et al.*, 2005). Une modification de la porosité du sol et un accroissement des conductivités hydrauliques des horizons superficiels ont été mis en évidence par différentes approches : simulation de ruissellement *in situ*, expérimentation sur colonnes non perturbées et observation en lames minces de la structure du sol (Benoit *et al.*, 2003). Des indicateurs du fonctionnement de la macroporosité du sol sont donc particulièrement intéressants pour une estimation du risque de transfert rapide au travers des sols enherbés. Ce transfert peut être vertical mais aussi latéral via des écoulements hypodermiques. Afin de le vérifier, une perspective immédiate de ce programme a été de suivre *in situ* les concentrations dans la solution du sol suite à l'infiltration au travers de dispositifs enherbés (Thèse de J.G. Lacas, Cemagref Lyon).

La **rétenion** des produits phytosanitaires à la surface du dispositif enherbé peut être importante pour des molécules à forte capacité de rétention comme l'ont montré les résultats obtenus avec le diflufenicanil. Par contre pour des molécules plus solubles dans l'eau et transportées majoritairement sous forme dissoute, cette rétention à la surface des dispositifs est plus faible. Ceci est confirmé par l'étude détaillée de la rétention par les horizons très superficiels. Dans ces horizons, l'abondance des matières organiques particulaires et leur accessibilité explique les potentialités de rétention accrues pour les produits phytosanitaires présents dans le ruissellement (Madrigal, 2004). Ceci est susceptible d'intervenir lors d'écoulements latéraux à travers le mat racinaire ou verticaux lors de l'infiltration vers les horizons inférieurs. Des produits faiblement retenus comme l'isoproturon conservent cependant une mobilité potentielle importante puisqu'une large part est mobilisable par désorption.

Concernant la recherche d'indicateurs de la dissipation des produits retenus dans les sols des dispositifs enherbés et boisés, les résultats du programme montrent une augmentation de la **dégradation** de l'isoproturon dans les horizons superficiels des sols enherbés. Ces potentialités de dégradation décroissent avec la profondeur. Si l'on compare zones enherbées et zones boisées, la dégradation la plus intense est observée sous couvert herbacé. La **stabilisation de résidus** sous formes de résidus non extractibles, donc très peu disponibles, est particulièrement importante dans les horizons où la dégradation est la plus importante. Cette relation entre dégradation et formation de résidus non extractibles d'isoproturon peut être expliquée par l'apparition de métabolites dont la rétention est beaucoup plus intense et très irréversible comme le montrent les résultats concernant l'isopropylaniline. Ce point reste limité à la dégradation de l'isoproturon et à des molécules au comportement similaire, en particulier d'autres urées substituées, la dégradation d'autres micropolluants organiques n'ayant pas été abordé dans ce programme.

Une seconde attente du projet était d'évaluer comment les effets des dispositifs enherbés vont dépendre de leur âge et de leur mode de gestion et enfin des conditions pédoclimatiques. Des comparaisons entre différents sites expérimentaux représentant des milieux pédoclimatiques différents ont essentiellement porté les processus de rétention et de dégradation des pesticides. L'apport de matières organiques non humifiées suite à l'implantation de dispositifs enherbés est observé même pour des dispositifs récents (3 ans d'implantation). Ce gradient naturel de différents états de matières organiques induit des différences de comportement dans la rétention et sa réversibilité entre la surface du sol (mat racinaire) et les horizons sous-jacents. La comparaison de Brunisols et d'un Calcisol enherbés montre des tendances très similaires pour ces deux types de sol. Enfin, le mode de conduite des surfaces enherbées tel que nous l'avons abordé ici sur un des sites, entretien minimum sur une jachère ou fauches plus fréquentes sur bandes expérimentales, ne semble pas influencer significativement les propriétés de rétention des herbicides (Madrigal *et al.*, 2002).

Pour les différentes situations étudiées, une augmentation de la dégradation de l'isoproturon dans les horizons superficiels des sols enherbés est constatée dans les différents types de sol. Cette potentialité accrue en surface et décroissant avec la profondeur est expliquée par l'augmentation de l'activité microbienne dans les horizons superficiels influencés directement par la végétation. Quel que soit le type de sol, l'enherbement entraîne une augmentation rapide de la proportion de matières organiques facilement décomposable qui stimule l'activité biologique. Pour l'isoproturon, cette dégradation modifie rapidement la disponibilité des résidus comme l'a montré l'accroissement de la formation de résidus très peu disponibles liée à la dégradation observée dans les 2 Brunisols et dans le Calcisol enherbé.

Il conviendrait d'étendre ces conclusions à une plus grande variété de situations pédologiques. Un acquis de ce programme est que l'enherbement d'un sol crée des conditions favorables à la rétention et à la dégradation des pesticides et que l'établissement de ces conditions est directement lié aux modifications de la composition organique des horizons superficiels (Benoit *et al.*, 2003).

Au final, l'ensemble des connaissances acquises a servi à la modélisation du fonctionnement local de dispositifs enherbés dans le cadre de deux programmes qui ont été initiés parallèlement : Action INRA-

Cemagref AQUAE (coord. R. Moussa INRA Montpellier) et Pesticides du MEDD (coord. N. Carluer Cemagref Lyon) et en particulier dans le cadre la thèse de Jean-Guillaume Lacas, 2005 (Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées. Etude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface, Université Montpellier II).

Publications

Publications scientifiques

- Benoit P., Barriuso E., Vidon P., Réal B. 2000. Isoproturon movement and dissipation in undisturbed soil cores from a grassed buffer strip. ***Agronomie***, 20, 297-307.
- Souiller C., Coquet Y., Pot V., Benoit P., Réal B. et al., 2002. Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires Première partie : Dissipation des produits phytosanitaires à travers un dispositif enherbé : mise en évidence des processus mis en jeu par simulation de ruissellement et infiltrométrie. ***Etude et Gestion des Sols***, 9: 269-285.
- Madrigal I., Benoit P., Barriuso E., Etiévant V., et al. 2002. Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires Deuxième partie : Propriétés de rétention de deux herbicides, l'isoproturon et le diflufénicanil dans différents sols de bandes enherbées. ***Etude et Gestion des Sols***, 9: 287-302.
- Benoit P., Souiller C, Madrigal I., Pot V, et al. 2003. Fonctions environnementales des dispositifs enherbés en vue de la gestion et de la maîtrise des impacts d'origine agricole : cas des pesticides. ***Etude et Gestion des Sols***, 10: 215-228.
- Pot V., Simunek J., Benoit P., Coquet Y., et al. 2005. Impact of rainfall intensity on the transport of two herbicides in undisturbed grassed filter strip soil cores: evaluation of equilibrium and non-equilibrium transport models ***Journal of Contaminant Hydrology***, 81, 63-68.
- Vincent A., Benoit P., Pot V., Madrigal I., et al. 2006. Impact of different land uses (cultivated plot, vegetative filter grass strip and woodland) on two herbicides migration in a silt loam soil: unsaturated soil column displacement studies. ***European Journal of Soil Science***, on line, July 2006.
- Lacas, J.-G., Voltz M., Gouy V., Carluer N. et Gril L J.-J. 2005. Using grassed strips to limit pesticide transfer to surface water : a review. ***Agronomy for sustainable development*** 25: 253-266.

Thèses

- Ismael Madrigal, 2004. Rétention de pesticides dans les sols de dispositifs tampon, enherbés et boisés - Rôles des matières organiques. Thèse de Doctorat de l'INAPG.

Impact de la récolte et de la régénération des peuplements sur la fertilité des sols forestiers. Exemple pour un peuplement de 70 ans de Douglas dans le Beaujolais

Coordinateur du projet :

Jacques RANGER

Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, INRA centre de Nancy, 54280 Champenoux
ranger@nancy.inra.fr

Participants :

UR 1138 INRA Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, 54280 Champenoux

UMR 1229 INRA-Université de Bourgogne, Microbiologie et Géochimie des Sols, Centre des Sciences de la Terre, Laboratoire Géosol, 6 Boulevard Gabriel, 21000 Dijon

UMR 7137 CNRS-UHP LIMOS Laboratoire d'études des interactions, Minéralogie, Microbiologie, Matières organiques des sols, BP 239 - 54506 Vandoeuvre

Résumé

Avant propos

La coupe à blanc d'un peuplement forestier peut représenter une phase traumatisante pour le sol à qui ont soustrait un pool d'éléments actifs (exportations par les récoltes), et qui est brutalement mis à nu, voire qui peut subir un scalpage des horizons organiques riches en C et en éléments. L'exemple ancien du Hubbard Brook Forest (NH) où les pertes ont été énormes hante encore les forestiers.

Objectifs

Le Douglas est une essence productive très utilisée dans les reboisements des sols de basse montagne (350 000 ha en France). Ces sols souvent libérés par l'agriculture sont propices à cette culture s'ils ne sont ni calcaires ni hydromorphes.

Le Douglas est donc un bon exemple pour tester les pratiques sylvicoles semi-intensives sur la qualité et la durabilité des sols

L'hypothèse à tester était que le sol mis à nu allait développer une minéralisation et une nitrification intempestives compte tenu de l'antécédent agricole, de la nitrification forte avant la coupe, de la présence de couches holorganiques abondantes, et que, les pertes par drainage risquaient d'être conséquentes après la coupe à blanc.

Méthode

Un site atelier instrumenté en 1992 dans le Beaujolais sert de support à cette étude. Une chronoséquence de 3 peuplements a été suivie pendant 6 ans puis le peuplement le plus âgé a été coupé en 1998 pour étudier les effets de la coupe. Les stocks dans les sols et la biomasse ont été évalués et les flux d'éléments (pluie, pluviolessivats, transfert dans les sols, altération, exportation par la biomasse, pertes par drainage) ont été quantifiés.

Les bilans entrées-sorties ont été calculés pour les différents stades de développement du peuplement avant la coupe à blanc. Après la coupe qui n'a pas détruit les capteurs du sol (lysimètres avec ou sans tension, TDR), le suivi des flux a été réalisé pendant 3 ans.

Résultats et discussion

La coupe à blanc conduit à des modifications très importantes du pédoclimat et se traduit par une rupture des cycles biogéochimiques associés au peuplement forestier. Ces modifications se répercutent sur l'activité biologique et les transferts d'eau et d'éléments.

Dans le cas précis du Beaujolais, la diminution de la minéralisation d'azote (mesurée *in situ*) et de la nitrification n'étaient pas attendus puisque le sol pourtant acide nitrifiait fortement. L'antécédent agricole avait été mis en avant pour expliquer les observations.

De ce fait, ce moteur de l'acidification n'a pas joué son rôle et la mobilisation des cations n'a pas eu lieu. Bien plus, les solutions gravitaires de surface ont vu leur concentration chuter très brutalement. Les solutions liées ont peu évolué.

Le sol solide a évolué de manière non dramatique en relation avec i- la minéralisation de la couche holorganique de surface et la rupture des cycles (K en particulier). Un protocole très lourd a été mis en place pour suivre l'évolution des sols dans un milieu variable spatialement (32 profils prélevés). Malgré la faible perturbation du sol, des évolutions significatives ont été mises en évidence, traduisant une légère acidification du sol.

L'ensemble des données a permis de proposer un schéma permettant d'expliquer le comportement du sol, solide et solutions.

Les pertes par drainage n'ont en définitive pas été majorées de manière très significative.

De plus, les travaux engagés sur deux autres sites ateliers de l'ORE Forêt, ont permis de proposer une hypothèse de travail pour expliquer la diminution de la nitrification après la coupe à blanc : le Douglas stimulerait les agents nitrifiants.

Conclusions

- *connaissance* : l'évolution de l'écosystème sous l'effet de la coupe à blanc a été mise en évidence. La variabilité des systèmes naturels impose des protocoles lourds difficilement applicables à la pratique courante pour mettre en évidence les évolutions du sol. Seul un réseau de sites où varient les conditions de milieu et de traitement pourraient permettre de simuler les effets.

Le rôle central des cycles du carbone et de l'azote a été mis en évidence dans l'évolution du sol après coupe à blanc.

La question du contrôle de la minéralisation de l'azote et de la nitrification par les végétaux est une question très pertinente dont les Microbiologistes se sont emparés. Une enquête multi-sites devra être réalisée pour apprécier les relations essences-minéralisation de N et nitrification.

- *appliqué* : une coupe à blanc n'est pas nécessairement un traumatisme majeur si certaines précautions sont prises. Il faut toutefois éviter de laisser le sol à nu car la végétation concurrente des jeunes plantations a un rôle majeur de régulation des flux de nutriments. Il est nécessaire de traiter plusieurs cas de figure avant de généraliser les conclusions. Il faut en effet séparer les effets propres aux essences, aux interactions avec le type de sol sans négliger le rôle de l'occupation passée du sol.

Publications

Ranger, J., Marques, R. & Jussy, J.H. (2001) : Forest soil dynamics during stand development assessed by lysimeter and centrifuge solutions. *For. Ecol. Manage.*, 144, 1-3 : 129-145.

Gérard, F., François, M. & Ranger, J. (2002) : Processes controlling silica concentration in leaching and capillary soil solutions of an acidic brown forest soil (Rhône, France). *Geoderma*, 107, 3-4 : 197-226.

Ranger, J., Allie, S., Gelhaye, D., Pollier, B., Turpault, M.P. & Granier, A. (2002) : Nutrient budgets for a rotation of a Douglas-fir plantation in the Beaujolais (France) based on a chronosequence study. *For. Ecol. Manage.*, 171, 1-2 : 3-16

Jussy, J.H., Ranger, J., Bienaime, S. & Dambrine, E. (2004) : Effects of a clear-cut on the *in situ* nitrogen mineralisation and the nitrogen cycle in a 67-year-old Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) plantation. *Ann. for. Sci*, 61, 5 : 397-408.

Ranger, J., Loyer, S., Gelhaye, D., Pollier, B., Bonnaud, P. (2006): Effects of the clear-cutting of a Douglas-fir plantation (*Pseudotsuga menziesii* F.) on the soil solutions and on losses on drainage waters. *Ann. For. Science* (sous presse)

Ranger, J., Bonnaud, P., Gelhaye, D., Bouriaud, O.: Clear-cutting in a Douglas-fir plantation: effects on soil fertility. *Geoderma (soumis)*

Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés Phénomènes physiques et dispositifs d'action

Coordinateur du projet :

Yves Le Bissonais

Laboratoire d'étude des Interactions Sol-Agrosystème-Hydrosystème, UMR LISAH AgroM-INRA-IRD,
place Viala - 34060 Montpellier Cedex 1
lebisson@ensam.inra.fr

Participants :

Alain Couturier⁽¹⁾, Olivier Cerdan⁽¹⁾, François Papy⁽²⁾, Philippe Martin⁽²⁾, Véronique Souchère⁽²⁾, Jean-François Bruno⁽³⁾, Pélagie Lebrun⁽³⁾, Denis Fox⁽⁴⁾, Jean Morschel⁽⁴⁾, Bernard Elyakime⁽⁵⁾

⁽¹⁾ INRA Science du sol Orléans

⁽²⁾ INRA SAD APT / INA- P G

⁽³⁾ INRA SAD Toulouse

⁽⁴⁾ Université de Nice, Géographie

⁽⁵⁾ INRA Toulouse, Economie

Résumé

L'érosion hydrique est une des **causes majeures de la dégradation des sols** dans le monde. Ce phénomène, essentiellement irréversible, entraîne une **perte de potentiel** de production du sol là où il est décapé et, au-delà, de **nombreux dégâts**: coulées boueuses, parfois violentes, détérioration de la voirie, d'ouvrages d'art, pollution de l'eau par des molécules dissoutes, des particules en suspension, eutrophisation... L'érosion hydrique est influencée par les façons culturales pratiquées et les aménagements qui se trouvent sur le territoire cultivé. L'évolution de l'agriculture des dernières décennies a contribué à aggraver les phénomènes érosifs. L'opinion publique en donne des raisons qui ne sont pas toutes avérées. Cependant, certaines caractéristiques de cette évolution comme le retournement des prairies et l'agrandissement des parcelles ont un effet manifeste.

Cette évolution fait de l'érosion des sols cultivés **une question d'actualité**, comme l'atteste la coïncidence de deux mesures importantes ces derniers mois : au niveau national, la loi sur les risques naturels (Décret du 12 février 2005) qui impose aux préfets de délimiter dans chaque Département les zones d'érosion des sols agricoles, et d'établir un programme d'actions visant à réduire l'érosion ; au niveau européen, le projet de directive sur la protection des sols (22/09/2006) qui prévoit le recensement des zones exposées à un risque d'érosion (article 6), et la mise en place de mesures destinées à lutter contre l'érosion (article 8).

La France présente cependant une grande diversité de situations érosives des territoires agricoles dont il est important de tenir compte, tant pour le zonage des risques que pour la mise en place de mesures anti-érosives. La nature des sols et du climat, la morphologie, les modes d'occupation du sol, les systèmes de culture et le parcellaire induisent **différents systèmes érosifs** qui se caractérisent par des combinaisons spécifiques de processus physiques de détachement, de transport et de dépôt. Par ailleurs, les **conditions de maîtrise de l'érosion**, par des actions individuelles ou collectives, de phénomènes érosifs se développant sur un territoire agricole sont encore mal connus.

Ce projet a donc eu pour objectif d'analyser cette diversité des systèmes érosifs et des conditions de sa maîtrise dans une démarche qui allie étroitement Science du Sol, Agronomie, disciplines économiques et sociales.

Trois aspects, ont été abordé simultanément par les partenaires du projet:

1. **l'évaluation du potentiel érosif des territoires**, qui permet de hiérarchiser et localiser les zones à risques au sein d'un territoire donné, qui permet aussi l'identification des principaux facteurs de ce risque, et donc l'orientation vers un type de mesures anti-érosives ;
2. **l'évaluation technique des mesures anti-érosives**, par la mise en place d'expérimentations et l'analyse d'indicateurs des conditions d'applications et des marges de manœuvre au niveau des

exploitations et des collectivités dans chacun des deux secteurs étudiés, à partir d'un inventaire de mesures déjà testées ou envisagées ;

3. **la formalisation et l'évaluation économique des actions anti-érosives**, qui a consisté à développer une démarche d'analyse économique de cette question, puis à l'appliquer dans chacun des secteurs étudiés, à partir de l'étude de cas observés sur le terrain.

La **synthèse** de ces trois approches nous a conduit à identifier des combinaisons de mesures adaptées à chaque type de situations érosives, puis à évaluer ces mesures par simulation au moyen de **modèles physiques et économiques** afin d'en estimer l'efficacité et l'utilité socio-économique. Ces modèles constituent ainsi des outils pour tester l'impact de différents scénarios d'aménagements ou de changements d'occupation des sols.

En ce qui concerne l'évaluation spatiale des risques d'érosion, le travail réalisé au cours de ce projet a permis le développement et la validation d'outils de modélisation à plusieurs échelles :

- au niveau régional, le modèle développé permet de hiérarchiser les zones à risque et de porter un diagnostic dans les deux régions étudiées : Pays de Caux et Lauragais. Les résultats cartographiques apportent une information à la fois globale, homogène et précise sur les zones présentant des risques d'érosion des sols et permettent d'identifier les facteurs ou combinaisons de facteurs en cause. Ils permettent une première analyse des situations à risque qui peut ensuite conduire à une approche plus fine de sites représentatifs et à l'étude de mesures susceptibles de limiter ces risques à l'échelle locale. Ce modèle a été depuis appliqué à différents départements et régions de France. Il fait aujourd'hui l'objet d'une étude de faisabilité afin de constituer la base méthodologique d'une procédure de zonage de l'aléa érosion dans le cadre de la loi sur les risques naturels de 2005 ;

- au niveau des bassins versants élémentaires le modèle STREAM, développé en partie dans le cadre de ce projet, permet de simuler et tester numériquement l'efficacité des mesures anti-érosives possibles sur un bassin versant, à partir des références expérimentales acquises sur le terrain.

En ce qui concerne l'évaluation de l'efficacité des mesures anti-érosives dans différentes conditions géographiques, les connaissances étaient limitées par le petit nombre de références expérimentales disponibles. Des dispositifs standardisés de mesure du ruissellement ont été mis au point dans le cadre de ce projet pour élargir la gamme et la représentativité des références disponibles. Les expérimentations ont porté en particulier sur la mesure de l'efficacité des bandes enherbées, sur l'influence des techniques d'implantation des cultures (affinement du lit de semence, labour ou non labour préalable au semis...), sur des techniques appliquées aux cultures en place (binage, buttage ou semis sous couvert...), sur la conduite des intercultures (déchaumage, couverture du sol...). Les dispositifs standardisés de mesure du ruissellement sont aujourd'hui diffusés auprès des acteurs de terrain afin de disposer de références fiables permettant de faire des choix raisonnés.

L'utilisation des tests de stabilité d'agrégats par la méthode développée à l'INRA d'Orléans constitue une approche plus légère pour évaluer l'efficacité de mesures agronomiques alternatives comme les Techniques Culturelles Sans Labour ou les systèmes intégrés (voir projets Dmostra et Most).

En ce qui concerne l'évaluation économique de ces actions anti-érosives, des informations précises sur les coûts de mise en œuvre de ces mesures anti-érosives, ainsi que sur certains coûts de l'érosion, ont été pour la première fois rassemblées, à partir d'études de cas et d'enquêtes de terrain auprès des agriculteurs et des collectivités. Les résultats obtenus dans le Pays de Caux sur quatre bassins versants montrent qu'il devrait être possible de proposer un outil de raisonnement économique de la gestion de l'érosion au sein de petits bassins versants agricoles en se basant sur des données simples comme les marges brutes, les chiffres d'affaire, les temps et coûts de travaux à mettre en œuvre pour la mise en place et l'entretien des ouvrages. Nous avons montré, par l'étude d'un cas typique sur le Lauragais, que les parcelles érosives d'exploitations agricoles de grandes cultures étaient plus difficilement aménageables que celles mixtes de cultures et élevages, en termes de choix anti-érosifs à adopter et de coûts par rapport aux gains potentiels. Sur des exploitations de grandes cultures, la modification du travail du sol, le redécoupage du parcellaire, la combinaison des cultures d'été et d'hiver sur une même parcelle sont alors essentielles car peu coûteuses tandis que la mise en place de bandes enherbées, plus coûteuses pour l'agriculteur, doivent être réservées à des problèmes importants. La résolution des problèmes érosifs sur des exploitations mixtes d'élevage et cultures se fait par contre à un coût très faible et peut même être avantageuse pour l'agriculteur.

Les exemples étudiés dans ce projet indiquent qu'il existe une grande variété de situations du point de vue des coûts et de la faisabilité de ces mesures. Nous avons aussi montré que la mise en place d'une mesure de lutte anti-érosive représente très souvent un risque pour l'agriculteur, risque d'une perte de

temps, risque d'une perte financière comme cela a été montré dans les deux régions. Il est donc essentiel que la stratégie d'intervention soit bien ciblée car un échec ne ferait que démotiver l'ensemble des agriculteurs. Une étude plus approfondie des conditions et facteurs agronomiques et socio-économiques de faisabilité de mise en œuvre de ces mesures a fait l'objet d'un autre projet soutenu par l'appel d'offre Gessol (V. Souchère).

En ce qui concerne les simulations de scénarios en couplant les modèles physique et économique, nous avons montré que les deux zones d'étude, Pays de Caux et Lauragais, correspondent à deux systèmes différents du point de vue des interactions spatiales entre unités fonctionnelles et unités décisionnelles : des bassins versants élémentaires occupés par plusieurs parcelles appartenant à différents agriculteurs dans le premier cas, des versants entièrement gérés par un seul agriculteur dans le second cas. Ces deux types de situation vont donc conduire à des modalités différentes de mise en œuvre des démarches de maîtrise de l'érosion des sols que nous avons commencé à explorer, pour des situations simplifiées, par des simulations couplées de l'efficacité de mesures anti-érosives et de leur bilan économique.

Dans le Pays de Caux, nous avons pu utiliser conjointement les modèles physique et économique pour faire l'évaluation économique de différents scénarios. L'analyse de sensibilité des modèles montre qu'il y a encore beaucoup d'approximation dont il faut tenir compte lors des classements de scénarios proposés en sortie. Il faut ainsi continuer à constituer des bases de référence par rapport aux coûts des dégâts liés à l'érosion et exprimer ces valeurs dans un référentiel compatible avec les sorties proposées par les modèles physiques. En effet, les pertes en terre issues du modèle STREAM, que ce soit au niveau des ravines ou au niveau des dépôts sur les routes sont exprimées en m³ ou en tonne. Or, dans le modèle économique, les opérations de comblement des ravines n'intègre que la longueur pour estimer le coût. De même, le coût du nettoyage des routes est exprimé en fonction du temps et non de la quantité de terre à enlever. Ces simulations ont aussi montré l'importance des dégâts occasionnés par les zones de dépôts sur les parcelles agricoles. Le modèle physique est capable d'estimer la localisation de ces zones de dépôt mais il est difficile d'appréhender la réalité de la perte de culture par recouvrement. Ainsi, nous avons souvent considéré que la culture était complètement détruite alors que tout va dépendre de l'épaisseur effective du dépôt. Enfin, nous avons vu à travers les simulations, que le risque économique est variable. Par exemple, l'évaluation économique peut montrer que le scénario simulé est rentable lorsque la ravine n'apparaît que dans une parcelle en blé. Or si dans la réalité, la ravine apparaît dans un lin ou une betterave, les pertes subites étant plus importantes, le scénario ne sera pas rentable. Cette difficulté à estimer le risque économique explique sans doute en partie pourquoi les agriculteurs sont assez peu enclins à installer des aménagements anti-érosifs.

Dans le Lauragais, une réorganisation du parcellaire représente l'option avec le plus grand impact sur le taux d'érosion et les coulées boueuses sur la voirie. Cependant, cet aménagement nécessite un investissement fort de la part de l'agriculteur ainsi que la création d'une nouvelle subvention qui prend en compte l'organisation spatiale des cultures. La bande enherbée ne s'attaque pas au problème de la dégradation des sols, mais elle permet la mise en place d'une mesure simple et administrativement reconnue. Comme pour tous les aménagements, la bande enherbée ne sera adoptée que lorsque les subventions compenseront entièrement la perte de production subie par l'agriculteur. Les résultats indiquent que les subventions nécessaires pour ce niveau de compensation pourraient théoriquement venir de la réduction des coûts d'intervention de la part de la DDE.

En conclusion, ce projet a permis de développer des outils et des méthodes pour hiérarchiser et localiser les zones à risques d'érosion au sein d'un territoire donné et pour évaluer l'efficacité technique et l'intérêt économique de pratiques anti-érosives. Les simulations réalisées montrent qu'une aide à la lutte contre l'érosion devrait permettre de réduire les dégâts par la mise au point de modes de production préservant les sols agricoles, dans des conditions économiquement intéressantes pour la société. Le risque nul n'existe cependant pas et les mesures envisagées ont pour effet de réduire la fréquence et l'intensité des dégâts. Néanmoins, en cas d'érosion en situation de catastrophe naturelle, l'existence prochaine de primes différenciées selon l'importance du risque de catastrophe naturelle va rendre la prévention érosive essentielle. Dans tous les cas, l'incitation à la prévention érosive devrait être de plus en plus forte (loi « prévention des risques technologiques et naturels » et Directive européenne sur la protection des sols) et la demande en techniques anti-érosives de plus en plus grande.

La maîtrise collective par les agriculteurs du ruissellement érosif sur le territoire agricole

Coordinateurs du projet :

Véronique Souchère et François Papy
INRA, UMR SADAPT – 78850 Thiverval-Grignon
souchere@grignon.inra.fr, papy@grignon.inra.fr

Participants :

A. Joannon⁽¹⁾, P. Martin⁽¹⁾, A. Mathieu⁽¹⁾, D. Delahaye⁽²⁾, D. Gaillard⁽²⁾, P. Langlois⁽²⁾, P. Baudet⁽²⁾, M. Mainguenaud⁽³⁾, T. Paquet⁽³⁾, W. Jassiri⁽³⁾, Y. Le Bissonnais⁽⁴⁾, A. Couturier⁽⁴⁾

⁽¹⁾ UMR SADAPT INRA / INA P-G

⁽²⁾ Laboratoire MTG, Université de Rouen

⁽³⁾ Laboratoire PSI, Université de Rouen

⁽⁴⁾ INRA Science du sol d'Orléans

Résumé

En Haute-Normandie et plus particulièrement dans le Pays de Caux, le ruissellement boueux est à l'origine de graves problèmes touchant de larges pans de la société : agriculteurs (ravines, recouvrement de cultures...), communes (routes coupées), privés (caves inondées), gestionnaires de l'eau (turbidité de l'eau potable). Après une phase de traitement curatif du problème (bassins de rétention en amont des agglomérations) orchestrée et financée par le conseil général au niveau des collectivités locales, il est apparu nécessaire d'associer à ce volet curatif un volet préventif visant à réduire le ruissellement boueux en provenance du territoire agricole.

Sur la base des acquis, notamment ceux issus du projet GESSOL coordonnée par Y. Le Bissonnais, maintenant assez largement partagés entre les acteurs de terrains et les scientifiques, plusieurs grands types d'actions sont envisageables selon les objectifs recherchés à savoir : limiter la production de ruissellement, freiner et/ou intercepter les excès d'eau et enfin augmenter la résistance du sol à l'arrachement. Cependant, du fait que l'eau qui circule sur un versant ignore les limites de parcelles et d'exploitation, les actions techniques à entreprendre nécessitent une coopération entre agriculteurs sur des espaces voisins reliés entre eux par des fonctionnements hydrauliques. Le bassin versant constitue ainsi une délimitation spatiale pertinente pour concevoir entre exploitations voisines une gamme de solutions limitant le ruissellement et l'érosion. La mise en œuvre de ces solutions implique néanmoins une prise en compte des contraintes individuelles de chaque exploitation.

Ce projet a donc eu pour objectif d'aborder cette maîtrise collective par les agriculteurs du ruissellement érosif au sein du territoire agricole dans le cadre d'une démarche qui a allié étroitement des chercheurs de disciplines variées (Agronomie, Sciences du Sol, Géographie et Informatique) et des agriculteurs faisant déjà partis de réseaux animés par des institutions locales (AREAS, la Chambre d'Agriculture, les syndicats de bassins versants, etc.).

Quatre volets, ont été abordés simultanément par les partenaires du projet:

4. **La coordination des systèmes de culture entre exploitations agricoles voisines** afin d'étudier les possibilités de modifications des systèmes de culture –c'est-à-dire les successions de culture et les itinéraires techniques associés- en tenant compte des marges de manœuvre dont les agriculteurs disposent pour modifier par exemple la localisation des cultures ou leurs pratiques culturales en période d'interculture.
5. **L'étude des interactions entre ruissellement boueux et Systèmes de culture** par la mise en place d'expérimentations, dans le cadre d'une collaboration entre des organismes de recherche, d'enseignement, de développement de type généraliste ou spécialisé sur une culture, pour caractériser le ruissellement à la parcelle mais aussi par le développement de procédures informatisées pour simuler et analyser des configurations optimales en terme de localisation des cultures.

6. **L'évaluation du potentiel érosif des territoires**, pour essayer de hiérarchiser et de localiser les zones à risques au sein de bassins versants agricoles à partir d'outils capables de quantifier avec une relative précision, le ruissellement et les pertes en terre afin d'évaluer les conséquences des décisions des agriculteurs.
7. L'intégration des résultats issus des trois premiers volets nous a permis de réfléchir sur la **gestion collective d'un territoire** pour tester non seulement l'efficacité de modification des pratiques agricoles sur la réduction du ruissellement à l'échelle du bassin versant mais aussi les possibilités d'associer les agriculteurs à ce genre de démarche.

Les résultats acquis dans le cadre du volet 1 ont permis de proposer un modèle des règles de localisation des cultures par les agriculteurs sur le territoire des exploitations agricoles et un modèle de calendrier d'organisation du travail pour les opérations techniques sur les parcelles, incluant les règles de priorité entre chantiers. L'utilisation de ces modèles a permis de déduire les marges de manœuvre dont disposaient les agriculteurs pour modifier leurs systèmes de culture (localisation des cultures, introduction de travaux supplémentaires en. interculture tels que le déchaumage à soc et/ou le semis de cultures intermédiaire)

En ce qui concerne le volet 2, les résultats acquis ont permis d'accroître nos connaissances de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement en élargissant la gamme et la représentativité des références régionales disponibles grâce à l'utilisation de dispositifs standardisés de mesure du ruissellement, par différents acteurs de terrain réunis en un réseau de collaboration actif. Par ailleurs, les travaux menés montrent clairement l'apport de la modélisation pour la génération de solutions appropriées et mieux adaptées aux besoins des décideurs.

Les progrès réalisés dans la mise au point d'outils de modélisation intégrant l'effet des pratiques agricoles, tel que STREAM dont le développement a été initié dans le cadre du projet GESSOL coordonné par Y. Le Bissonnais, et surtout leur transfert dans des systèmes informatiques pourvus d'interface utilisateur plus conviviale (volet 3) permettent maintenant de disposer d'outils efficaces non seulement pour hiérarchiser les zones à risque et de porter un diagnostic sur les principaux facteurs en cause mais aussi pour simuler et tester numériquement l'efficacité des mesures antiérosives possibles sur un bassin versant.

En regroupant les deux échelles pertinentes à savoir le bassin versant élémentaire et l'exploitation agricole, l'analyse spatiale et la modélisation ont permis, dans le cadre du volet 4, de proposer des mesures anti-ruissellement et anti-érosion, raisonnées individuellement sous contrainte collective. La première approche a consisté à objectiver les marges de manœuvre de chaque agriculteur mais la mise en œuvre de solutions tenant compte de ces marges n'a pas encore été confrontée aux conceptions des agriculteurs. La seconde approche fondée sur une concertation directe avec les agriculteurs a montré l'importance de définir des règles communes s'appliquant à chaque agriculteur. Elle s'apparente à un prototype d'actions négociées et concertées.

En conclusion, on peut dire que les résultats obtenus montrent qu'en présence de transferts latéraux entre parcelles voisines, il est important de coordonner dans l'espace les systèmes de culture. Cette coordination doit se faire au sein des exploitations agricoles mais dans certains cas elle doit aussi s'envisager entre exploitations voisines. Favoriser ces coordinations peut permettre de réduire la fréquence et l'intensité des dégâts sans pour autant faire disparaître complètement le risque et ce d'autant plus que toutes les exploitations n'ont pas les mêmes marges de manœuvre par rapport aux modifications des pratiques que nous avons testées. Mais, pour être mise en œuvre par les agriculteurs, cette coordination doit, perturber le moins possible l'affectation des facteurs de production aux différentes cultures, notamment la terre et le temps de travail et en plus ne pas occasionner de frais supplémentaires excessifs. Il importe également de prendre en compte que les actions des agriculteurs ne sont pas seulement déterminées par des faits matériels (structure du parcellaire, organisation du travail, etc.), mais également par la conception qu'ils ont de leurs pratiques ce qui peut influencer sur l'adoption ou le refus de nouvelles pratiques selon que celles-ci sont ou pas en cohérence avec l'idée qui s'en font.

Ce programme GESSOL a permis d'initier des recherches complémentaires. Dans le cadre du projet « Elaboration et mise en œuvre de dispositifs pour la gestion des territoires générant des coulées boueuses » du programme « Risque, décision, Territoire » financé par le MEED, les aspects liés à la caractérisation du ruissellement sont complétés avec des études portant sur les conditions sociales et économiques de la maîtrise de l'aléa ruissellement érosif. Dans le cadre du projet « la modélisation d'accompagnement : une

pratique de recherche en appui au développement durable » du programme « Aménagement et Développement Durable » financé par l'ANR, nous construisons avec les acteurs (Agriculteurs, Elus, Animateurs de Syndicat de bassin versant, Conseillers Agricoles, etc.) des modèles et outils (Systèmes Multi-Agents et des Jeux de Rôles) pour aborder les processus de coordination entre acteurs et les processus de décision collective.

Contamination des sols

**Contamination des sols par les éléments en traces
et par les micro-organismes pathogènes**

Animateur : J. Berthelin

Caractérisation de la biodisponibilité des éléments en traces dans les sols et validation de mesures fiables

Coordinateurs du projet :

Guillaume Echevarria et Jean-Louis Morel

Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120 ENSAIA-INPL/INRA,
2, avenue de la forêt de Haye, BP 172 – 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy
echevarr@ensaia.inpl-nancy.fr, morel@ensaia.inpl-nancy.fr

Participants :

S. Massoura⁽¹⁾, T. Becquer⁽²⁾, C. Quantin⁽²⁾, E. Jeanroy⁽²⁾, J. Berthelin⁽²⁾, A. Bourg⁽³⁾, M. Kedziorek⁽³⁾, C. Reynal⁽³⁾

⁽¹⁾ LSE UMR 1120 ENSAIA-INPL/INRA, Vandoeuvre-lès-Nancy

⁽²⁾ IRD, CPB-CNRS, UMR IDES UPS11-CNRS

⁽³⁾ Université de Pau et des Pays de l'Adour, LCADIE-UPPA

Résumé

Les éléments en traces sont, en général, présents dans les sols à de faibles concentrations de l'ordre de quelques mg kg^{-1} à quelques centaines de mg kg^{-1} selon les éléments, mais ils peuvent parfois atteindre des teneurs largement supérieures à celles constatées en moyenne dans la couverture pédologique. La raison de ces anomalies peut être soit naturelle soit anthropique. Dans le premier cas, certaines roches mères affleurantes possèdent des caractéristiques particulières, dont une forte teneur en éléments en traces. Parmi les roches concernées, les plus fréquentes sont les roches ultramafiques, composées de minéraux ferromagnésiens qui sont par nature riches en cobalt, en chrome, en manganèse et en nickel, et parfois en cuivre et en zinc. Les concentrations des éléments en traces dans ces roches peuvent dépasser $1\,000\text{ mg kg}^{-1}$ et les concentrations retrouvées dans les sols sont en conséquence élevées et souvent supérieures à celles de la roche mère. Dans le deuxième cas, les activités contaminantes essentielles sont avant tout les activités métallurgiques, depuis l'extraction des minerais jusqu'aux usines sidérurgiques ou métallurgiques. D'autres activités urbaines et industrielles multiples contribuent à la dissémination de ces éléments utilisés dans de nombreuses technologies actuelles ou passées ou même simplement dans les déchets ménagers. L'agriculture contribue elle-même à cette dissémination à travers l'emploi de pesticides à base de cuivre et de fertilisants phosphatés souvent riches en cadmium et en arsenic.

La contamination des sols par les éléments en traces est un problème environnemental majeur pour deux raisons principales. D'une part, elle présente un risque écotoxicologique pour les chaînes alimentaires en raison des propriétés fortement toxiques de ces éléments pour l'ensemble des organismes vivants. D'autre part, cette contamination peut avoir des effets à très long terme car les éléments en traces présentent généralement une forte affinité chimique et physique pour la matrice solide des sols et ont donc un temps de résidence dans les sols très long. Ces deux caractéristiques nous amènent à nous intéresser à l'ensemble des propriétés de ces éléments dans les sols permettant d'expliquer leur accessibilité aux organismes vivants ainsi que l'évolution dans le temps de ces propriétés. Celles-ci peuvent être regroupées sous le terme de biodisponibilité. Cette dernière mérite d'être finement caractérisée de manière à rendre compte du risque et de son évolution dans le temps. De plus, pour pouvoir contrôler cette disponibilité lors d'action de remédiation ou de gestion des sols, il est nécessaire d'identifier les facteurs qui en sont à l'origine (e.g. minéralogie, conditions thermodynamiques, activité biologique).

Nous avons donc choisi le Ni comme ETM modèle pour définir clairement la disponibilité d'un élément, identifier des techniques fines et de routine de mesure de cette disponibilité en comparaison avec l'absorption par les végétaux et enfin, caractériser les facteurs environnementaux contrôlant cette disponibilité.

Le nickel, métal potentiellement toxique, est présent dans tous les sols avec une concentration moyenne de $20\text{ à }30\text{ mg kg}^{-1}$, atteignant parfois $10\,000\text{ mg kg}^{-1}$ (e.g. sols ultramafiques). Le risque écotoxicologique associé à la présence de Ni dans les sols (naturellement riches ou contaminés) pour les organismes

vivants est contrôlé par sa disponibilité. Cette dernière peut être caractérisée par une intensité (activité des ions Ni libres en solution) une quantité (réservoir échangeable en phase solide en équilibre dynamique avec l'intensité) et quantité (caractérisation du pouvoir tampon exercé par les formes échangeables sur l'intensité). Nous avons développé la méthode des cinétiques d'échange isotopiques du nickel sur 100 échantillons de terres provenant de 100 sols différents dont des sols ultramafiques en conditions climatiques variées ou des sols du Plateau Lorrain montrant des anomalies géochimiques ne permettant pas l'épandage de boues de station d'épuration. Nous avons montré que le pH était le facteur principal influençant à la fois l'intensité et la quantité (nickel isotopiquement échangeable, E_i). Nous avons aussi montré que cette dernière (E_i) pouvait facilement et reproductiblement être caractérisée par une extraction simple à l'acide diéthylène triamine pentaacétique (DTPA) permettant ainsi en routine d'obtenir une quantification fiable du Ni échangeable et donc disponible. Plusieurs plantes montrant des comportements d'accumulation variés du Ni (*i.e.* hyperaccumulation, indication, exclusion) ont prélevé le Ni dans ce même compartiment isotopiquement échangeable sur les 4 terres utilisées validant ainsi l'utilisation de E_i ou même de la fraction extraite par le DTPA pour estimer la phytodisponibilité.

Nous avons choisi parmi les 100 terres, 16 d'entre elles qui représentaient des sols variant de serpentinite récemment exposée à l'altération (terril de mine d'amiante) jusqu'aux Ferralsols tropicaux issus de plusieurs dizaines de millions d'années d'altération en milieu chaud et humide mais aussi des sols contaminés par l'homme et l'industrie du Ni (fonderie et raffinerie). Ces terres ont été caractérisées minéralogiquement (DRX) et les phases porteuses de Ni ont été identifiées. Le degré de cristallisation du Fe libre a aussi été caractérisé par des extractions à l'oxalate (Tamm) ou au citrate-bicarbonate-dithionite (Mehra-Jackson). Les minéraux identifiés vont depuis les minéraux ultramafiques primaires (serpentes, talcs, chlorites) aux secondaires de type phyllosilicate (smectites) ou de type oxy-hydroxydes de Fe/Mn (ferrihydrite, goethite, oxydes de Mn) et leur occurrence est fonction de l'intensité de l'altération (climat, âge). Les minéraux primaires hérités des matériaux parents et les phyllosilicates secondaires formés en conditions de faible altération et lessivage contenaient des teneurs similaires en Ni avoisinant 0,2 à 0,3%. Les oxydes de Fe, en comparaison des autres minéraux secondaires, montraient un enrichissement léger (0,4 à 0,8%) en conditions d'altération modérée jusqu'à un enrichissement 10 fois supérieur dans les Ferralsols tropicaux de Nouvelle Calédonie (4–6%). La caractérisation complète des trois facteurs de la disponibilité du Ni dans ces sols a été réalisée par la méthode des cinétiques d'échange isotopique : intensité (C_{Ni}), quantité (E_i) et capacité ou pouvoir tampon. Pour l'ensemble des sols, C_{Ni} and E_i variant conjointement : les valeurs élevées de ces deux facteurs ont été trouvées pour les sols ou les phases porteuses de Ni dominées par, à la fois les phyllosilicates et les oxydes de Fe amorphes (Haute capacité d'échange). Les valeurs faibles ont été trouvées pour les sols possédant des quantités significatives de Fe libre cristallisé (essentiellement goethite) (Haute capacité de rétention). Dans le cas des sols contaminés par les activités industrielles, le contrôle de la disponibilité du Ni dépend aussi de la nature des phases porteuses. Les conclusions obtenues sur les milieux ultramafiques naturels s'appliquent donc aux milieux artificiellement contaminés par l'Homme.

La réduction bactérienne des oxydes de Fe et de Mn réalisée en expériences d'incubation de sols augmente la solubilisation des métaux, particulièrement sous conditions d'engorgement et de fourniture de molécules carbonées facilement dégradables. De plus, l'altération bactérienne peut modifier la distribution du métal à travers les minéraux porteurs mais aussi leur degré de liaison avec ces phases et donc leur disponibilité. La réduction bactérienne des oxydes des sols de Nouvelle Calédonie a conduit à la solubilisation de Fe, Mn, Ni et Co et à leur redistribution significative au sein des compartiments du sol (phases porteuses). Des extractions séquentielles sélectives ont montré une augmentation des teneurs en métaux (Fe, Mn, Co, Ni et Cr) dans les compartiments échangeables (intensité et quantité facilement échangeable). Les concentrations en métaux des oxydes de Fe amorphes ont été augmentées (ce sont aussi les réservoirs de Ni isotopiquement échangeable). Les oxydes de Mn ont significativement diminué et plus particulièrement sous activité microbienne intense. Les teneurs en métaux des oxydes de Fe cristallisés sont restées stables quelle que soit l'intensité de l'activité microbienne. Cette dernière a donc peu d'effet sur ces phases réputées stables et non disponibles (cf. paragraphe précédent).

Ainsi sera-t-il possible, à partir de ces connaissances, de prévoir des actions de remédiation des sols contaminés ou des solutions agronomiques adaptées pour réduire les transferts vers la chaîne alimentaire au long terme.

Eléments Traces Métalliques dans les sols : méthodes d'évaluation spatialisée et transferts vers les plantes zone de La Châtre (Indre)

Coordinateurs du projet :

Christophe Mouvet, Yann Itard

BRGM, avenue C. Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans

c.mouvet@brgm.fr, y.itard@brgm.fr

Participants :

D. Baize⁽¹⁾, D. King⁽¹⁾, I. Salpeteur⁽²⁾, L. Bideau⁽¹⁾, S. Cornu⁽¹⁾, R. Thomassone⁽³⁾, A. Couturier⁽¹⁾, S. Salvador⁽¹⁾

⁽¹⁾ INRA, Unité de Science du sol, Olivet

⁽²⁾ BRGM, Orléans

⁽³⁾ INA Paris , CNRZ

Résumé

La connaissance des fonds géochimiques est importante pour la détection des fortes teneurs en éléments traces qu'elles soient d'origine anthropiques ou naturelles. C'est également un moyen d'évaluer le transfert de ces éléments à partir des roches vers les sols, qui jouent un rôle déterminant comme interface vers les autres compartiments cibles que sont l'hydrosphère et la biosphère, puis les sédiments. .

Le premier objectif de ce travail était de comparer différentes méthodes d'évaluation et de spatialisation du fond géochimique (estimé à partir des sédiments) et du fond pédogéochimique (estimé à partir des sols). Le second objectif était d'examiner les relations entre la connaissance de ces fonds et les teneurs en éléments traces dans les végétaux, le blé tendre ayant été choisi comme plante modèle.

La zone test de La Châtre (550 km²) située aux sources de l'Indre, région essentiellement agricole, a été couverte par quatre méthodes de mesure des fonds (pédo-)géochimiques, méthodes différant par le type de milieu échantillonné et la densité des prélèvements. Une méthode (INRA) se base sur une cartographie des sols selon des familles pédo-géologiques qui suivent grosso modo la direction des contacts géologiques en majorité E-W. Les trois autres méthodes (BRGM) se basent sur les sédiments de ruisseaux et les limons d'inondation et donc un découpage par bassins versants, orientés en majorité N-S dans ce secteur (Tab. 1).

Milieu	Sites	Ech	Ech/km ²	Fraction	Mise en solution	Analyse	Eléments dosés
Sédiments sols fond de vallon (inventaire)	824 583	824 583	2.5	<125 µ	HClO ₄ , HCl, HF	DCP	22
Roches	29	29	0.05	Totale	Na ₂ O ₂	ICP-MS	37
Sols	120	235	0.5	<2 mm	HF,HClO ₄	A.A.	15
Sédiments large maille	91	91	0.2	< 2mm	HF,HClO ₄	ICP	37
Limons d'inondation	25	65	0.04	totale	HF,HClO ₄	ICP	37

Tab. 1 : méthodes de préparation et d'analyse des échantillons.

La répartition des principales anomalies en métaux et métalloïdes des sols, des sédiments et des limons d'inondation comparée aux teneurs des formations géologiques sous-jacentes échantillonnées de façon très ponctuelle, montre que dans cette région, l'essentiel des apports en métaux et métalloïdes est issu du réservoir lithologique.

Mis à part le Cu, le Fe et le Mn, la gamme de variation de tous les éléments traces décroît des sols vers les alluvions (sédiments) et les limons, traduisant une homogénéisation et une dilution croissante des

matériaux superficiels par les mécanismes d'érosion au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source primaire vers le bassin aval.

En ce qui concerne la représentativité par rapport aux formations géologiques initiales, la géochimie des limons et des sédiments donne des images plus fidèles de la répartition des anomalies naturelles héritées des roches que celles obtenues par les analyses des sols regroupés en familles pédo-géologiques. Une anomalie naturelle en Zn (> 300 ppm en sédiments), et Pb (> 200 ppm) très étendue (>20km²), dans un bassin amont de l'Indre, échappe au maillage aléatoire du prélèvement par famille pédo-géologique alors qu'elle est identifiée par les prélèvements en alluvions, que ce soit à faible densité (sédiments de ruisseaux majeurs) ou à très large maille en utilisant les limons d'inondation de rivières plus importantes.

La comparaison des compositions moyennes des horizons supérieurs et inférieurs des sols d'une part, et des limons d'inondation récents par rapport aux limons anciens d'autre part (tab. 2), montre une augmentation en P, Cd, et Pb qui pourrait traduire pro parte, un apport lié aux activités humaines et notamment aux engrais.

		Fe2O3	MnO	P2O5	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As	C.org
		%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%
Sols	Total	3.03	0.06	0.09	19	32	80	57	25	18	0.8
	Sup	2.31	0.09	0.13	18	39	79	51	23	18	1.6
	Inf	3.48	0.04	0.07	20	27	82	63	27	19	0.21
Limon	Total	3.27	0.08	0.099	19	41	73	48	23	11	1
	Sup	3.46	0.11	0.1	20	45	85	49	23	14	1.25
	Inf	3.14	0.07	0.095	18	40	77	43	22	12	0.85

Tab. 2 : comparaison des compositions moyennes pour les différents horizons.

L'activité minière ancienne autour de Montmarçon se traduit par une élévation des teneurs en Pb, Zn, Cd dans les sédiments et les limons détectée à plus de 4km en aval.

L'étude d'un versant riche en éléments traces a permis de mieux comprendre les processus à l'origine de la distribution spatiale de ces éléments dans le paysage. Si l'origine lithologique des éléments présents dans les sols est clairement confirmée, il apparaît néanmoins que les processus d'altération et surtout de transfert de matières le long des pentes sont à l'origine des différences de teneurs entre sols et sédiments. Enfin, il a été montré que l'influence anthropique liée aux pratiques agricoles (travail du sol, réseau de haies) joue un rôle fondamental dans l'homogénéisation des teneurs dans les horizons de surface ainsi que dans l'érosion et/ou le stockage le long des versants.

Pour appréhender le problème de la spatialisation, les sédiments et limons d'inondation permettent une couverture de l'ensemble de la zone d'étude à relativement faible densité et fournissent des indications précieuses pour l'implantation des prélèvements de sols. Les deux approches sont complémentaires d'un point de vue méthodologique, les variations relatives de teneurs des différents éléments traces métalliques sont comparables mais seul un échantillonnage en sol permet évidemment de déterminer la teneur d'un élément donné dans ce compartiment.

Dans le secteur étudié, plusieurs échantillons de sols se révèlent anormalement riches en un ou plusieurs éléments traces (Cd, Pb, Zn, Cu, Cr, Ni), et plusieurs de ces sols présentent des pH acides (< 5.5). Ces sols peuvent être considérés a priori comme sources de dangers car propices à la mobilité et/ou à la phytodisponibilité des métaux.

Malgré ces fortes anomalies en teneurs totales dans les sols, sur 56 échantillons de grains de blé, prélevés sur 5 familles pédo-géologiques différentes, une seule valeur de Cd excède la teneur maximale recommandée par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (aucune cause décelée) et aucune valeur de Hg ou de Pb n'approche la teneur maximale recommandée. Ceci est rassurant pour l'agriculture locale, tout du moins en ce qui concerne le blé, seule plante étudiée.

Malgré les difficultés théoriques de l'exercice, il semble possible de prédire le risque d'absorption du cadmium et d'accumulation de ce métal dans le grain de blé à partir de données analytiques mesurées sur des échantillons de sols. Le modèle qui donne les meilleurs résultats prend en compte la teneur totale en manganèse du sol, le cadmium extractible au DTPA et le cadmium extractible par le nitrate

d'ammonium, ce dernier pouvant être remplacé par le pH du sol. Ce modèle pourrait constituer un outil pratique d'estimation "a priori" des dangers de phytodisponibilité du Cd (et d'autres métaux comme Zn et Cu) pour le blé et permettrait d'éviter la réalisation de coûteuses et délicates analyses de grains. Ces résultats montrent également l'importance du manganèse pour aborder les phénomènes de rétention des métaux potentiellement polluants dans les sols ou, au contraire, de l'absorption de ces métaux par les plantes via les racines, en particulier en ce qui concerne le cadmium.

Cette étude pluridisciplinaire confirme que l'inventaire du fond pédo-géochimique est un moyen d'identifier les anomalies en éléments traces d'origine naturelle ou anthropique. Les teneurs totales dans les sols apparaissent comme des indicateurs nécessaires mais non suffisants pour la connaissance du risque de transfert vers les plantes ou vers les eaux. Des dosages des éléments traces après extractions sélectives doivent compléter cette première approche. A l'opposé, les informations géochimiques obtenues sur les sédiments et les limons d'inondation, bien qu'éloignés de la cible finale qu'est la plante cultivée, permettent une optimisation des méthodes de cartographie des éléments traces sur de grands territoires.

Prise en compte de l'incertitude dans la définition des objectifs de qualité des sols

(Rapport BRGM/RP-51683-FR, Juin 2002)

Coordinateur du projet :

Dominique Guyonnet

BRGM, Service Environnement et Procédés, Unité Gestion des déchets
3, avenue C. Guillemin, BP 6009 – 45060 ORLEANS
d.guyonnet@brgm.fr

Participants :

Didier Dubois, Bernard Bourguin, Jean-Paul Chilès, Bernard Côme

BRGM - 3, avenue C. Guillemin, BP 6009 - 45060 ORLEANS

Résumé

Dans le cadre du Programme GESSOL, piloté par l'INRA pour le compte du Ministère chargé de l'Environnement, le BRGM a réalisé un projet relatif à la prise en compte de l'incertitude dans la définition de critères de qualité des sols. S'agissant des sols contaminés par une activité industrielle, les réglementations françaises et européennes ne fournissent pas de valeurs de teneurs en polluants dans les sols permettant de définir un sol pollué. La proposition de Directive « Sols » (CE, 2006) par exemple, évoque la mesure de concentrations susceptibles de générer un risque (Article 10) et l'évaluation des risques pour la santé ou pour l'environnement (Article 11). Or l'évaluation des risques fait appel à des modèles qui comportent des incertitudes. Pour ce qui concerne les incertitudes liées aux paramètres des modèles d'évaluation des risques, elles ont principalement deux origines : elles peuvent être liées à l'hétérogénéité du milieu et au caractère aléatoire des phénomènes naturels (on parle alors de variabilité aléatoire ou d'incertitude objective), ou alors au caractère incomplet ou imprécis des connaissances concernant tel ou tel paramètre (on parle alors d'imprécision ou incertitude subjective). De plus en plus de travaux de recherche mettent en évidence la différence fondamentale entre variabilité aléatoire et imprécision (voir par exemple Ferson et Ginzburg, 1996). Le cadre adapté pour traiter la variabilité aléatoire est la théorie des probabilités. Mais supposer des distributions de probabilité uniques en présence d'imprécision revient à introduire une subjectivité qui biaise considérablement les résultats. D'autres théories de l'information ont été développées pour traiter de l'information imprécise/incomplète. Un exemple est la théorie dite « des possibilités » (Zadeh, 1978, Dubois et Prade, 1988).

De manière très synthétique, la théorie des possibilités permet de décrire l'information disponible relative à un paramètre imprécisément connu, à l'aide d'intervalles jugés plus ou moins vraisemblables. Ainsi, en présence d'un paramètre incertain, un expert pourra exprimer un intervalle en-dehors duquel il juge que les valeurs ne sont pas possibles (cet intervalle définit le « support » d'une distribution de possibilité ; Figure 1a) et un intervalle contenant les valeurs qu'il estime être les plus vraisemblables (cet intervalle est appelé le « noyau » de la distribution ; Figure 1a). Une distribution de possibilité (aussi appelée « nombre flou ») peut être vue comme un emboîtement d'intervalles ayant chacun son degré de vraisemblance, ou encore comme une famille de distributions de probabilité (Dubois et Prade, 1996 ; Figure 1b) délimitée par une distribution haute (appelée Plausibilité) et une distribution basse (appelée Croyance). La Figure 1b montre en pointillés quelques représentants d'une telle famille.

Le principal objectif du projet GESSOL-Incertitudes était de développer une méthodologie permettant de combiner une représentation probabiliste (adaptée à de la variabilité aléatoire) et possibiliste (adaptée à de l'imprécision) dans un même calcul de risque. Ainsi, la manière dont on représente l'information peut être plus conforme à la nature de cette information, évitant la subjectivité introduite par le choix arbitraire d'une distribution de probabilité unique en présence d'imprécision. On met ainsi l'accent sur l'information elle-même : de quel type d'information s'agit-il ? De mesures, de jugement d'expert, de données de la littérature, etc. ? C'est seulement ensuite qu'on sélectionne les outils adaptés pour représenter et propager cette information.

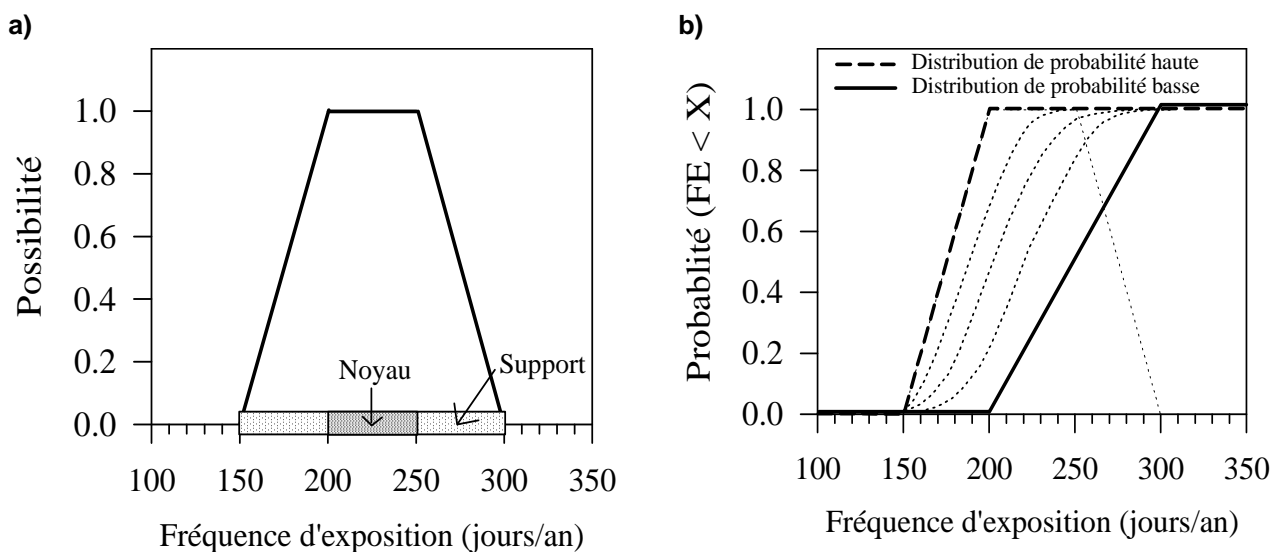


Figure 1 : Distribution de possibilité décrivant un paramètre imprécisément connu : la fréquence d'exposition à un polluant du sol. (a) : distribution de possibilité de noyau (valeurs jugées les plus vraisemblables) : 200-250 j/an et de support (intervalle en-dehors duquel les valeurs sont jugées invraisemblables) : 150-300 j/an. (b) : famille de distributions de probabilité correspondant à (a).

La méthode développée pour permettre la propagation conjointe de variabilité aléatoire et d'imprécision dans un calcul de risque a été baptisée « méthode hybride » (Guyonnet et al., 2003, Baudrit et al., 2005). A la suite de ce projet GESSOL, une thèse a été effectuée dans le cadre d'un partenariat BRGM-INERIS-IRSN sous la Direction de Didier Dubois de l'Université Paul Sabatier. Le thésard a pu préciser les possibilités et limites de l'approche proposée et identifier de nouveaux développements.

Dans le cadre du projet GESSOL-Incertitudes, l'approche « hybride » a été appliquée à l'estimation d'une dose de cadmium absorbée par une cible humaine par le biais de la consommation de légumes sur un site industriel. Le site sélectionné pour cette application était le site métallurgique de Noyelles Godault (Nord-Pas-de-Calais) dont les sols superficiels sont contaminés par des éléments traces métalliques liés aux fumées rejetées par une cheminée d'usine. A noter que l'objectif de cette application n'était en aucun cas une détermination définitive du risque que représente la présence de cadmium sur ce site, mais une illustration de l'approche hybride. Par rapport aux objectifs du projet, le jeu de données disponible pour ce site présentait un double avantage. D'une part, le nombre de mesures de teneurs totales en cadmium dans les sols superficiels était suffisant pour permettre une approche statistique de la répartition spatiale de la teneur, d'autre part les mesures de l'INRA (Luttringer et de Cormis, 1979) ont fourni des informations directes sur le transfert de cadmium depuis le sol vers la plante sur ce site. Pour une étude plus récente et détaillée de la répartition d'éléments métalliques dans des végétaux cultivés dans l'environnement de ce site, on se référera à Douay et Sterckeman (2002).

Compte tenu du caractère incomplet des connaissances relatives au transfert sol-plante, phénomène complexe influencé par de nombreux mécanismes, ce transfert a été appréhendé en faisant appel à la théorie des possibilités. L'évaluation du risque d'exposition au cadmium sur ce site comporte donc une dimension probabiliste (teneurs en cadmium du sol estimés à l'aide des mesures et de la géostatistique) et possibiliste (pour le transfert sol-plante). La méthode hybride a ensuite été appliquée au modèle d'exposition pour aboutir à une cartographie du risque aux alentours de l'usine. La carte de la Figure 2 présente ce risque sous la forme d'un « degré de possibilité » de dépasser la dose de Cd jugée tolérable par l'autorité sanitaire ($1 \mu\text{g j}^{-1} \text{kg}^{-1}$). Ce degré de possibilité constitue une limite haute (donc sécuritaire) du degré de probabilité de dépasser la dose tolérable. Ce type de support cartographique peut aider, dans un contexte décisionnel, à définir des servitudes et notamment des zones où la culture de légumes destinées à l'alimentation humaine doit être restreinte.

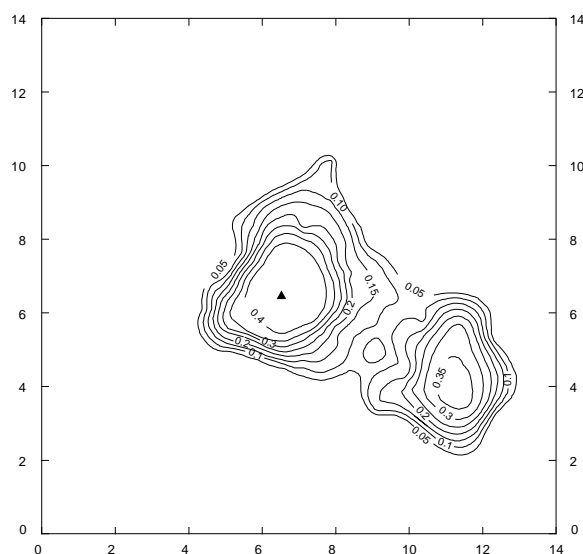


Figure 2 - Carte du degré de « possibilité » de dépasser la dose de Cd jugée tolérable ($1 \mu\text{g j}^{-1} \text{kg}^{-1}$). Graduations en km. Triangle = emplacement de la cheminée.

Références citées :

- Baudrit, C., Guyonnet, D., Dubois, D. (2005) – Post-processing the hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, Volume 131, Issue 12, pp. 1750-1754.
- Douay, F. et Sterckeman, T. (2002) - Teneurs en Pb, Cd et Zn dans les végétaux cultivés aux alentours d'usines métallurgiques. Dans : *Un point sur : les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. D. Baize et M. Tercé (Coord.). Publication INRA, Paris.
- Dubois, D., et Prade, H. (1988) - *Possibility theory*. New York Plenum Press, 263 pp.
- Dubois, D., and Prade, H. (1992) - When upper probabilities are possibility measures. *Fuzzy Sets and Systems*, 49, 95-74.
- CE (2006) – Proposition de Directive du Parlement Européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE.
- Ferson, S., Ginzburg, L. (1996) – Different methods are needed to propagate ignorance and variability. *Reliability and System Safety*, 54, 133-144.
- Guyonnet, D., Bourguin, B., Dubois, D., Fargier, H., Côme, B., Chilès, J.-P. (2003) – Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering* 129, 68-78.
- Guyonnet, D., Ménard, Y., Baudrit, C., Dubois, D. (2005) : *HyRisk – Traitement Hybride des Incertitudes en Evaluation des Risques* . Rapport BRGM/RP 53714.
- Luttringer, M., et de Cormis, L., 1979 - La pollution par les métaux lourds à Noyelles-Godault et ses environs (Pas de Calais). Rapport de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Montfavet (France), 12 pp.
- Zadeh, L., 1978 - Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3-28.

Pratiques pastorales et qualité microbiologique des eaux à l'échelle bassin versant : Rôle des facteurs pédoclimatiques et hydrométéorologiques dans la survie, l'état physiologique et le transfert des populations de bactéries fécales bovines.

(projet en cours)

Coordinateur du projet :

Jean-Marcel Dorioz
UMR CARTETEL INRA & Université de Savoie
BP 511 – 74203 Thonon-les-Bains
dorioz@thonon.inra.fr

Participants :

Claire Prigent-Combaret⁽²⁾, Dominique Trevisan⁽¹⁾, Stéphanie Texier⁽¹⁾, Bastien Fremaux⁽²⁾, Jérôme Poulenard⁽¹⁾, Philippe Quetin⁽¹⁾, Christine Vernozy-Rozand⁽²⁾, Yvan Moënnelocoz⁽²⁾, Lucile Jocteur-Monrozier⁽²⁾

⁽¹⁾ UMR CARTETEL INRA & Université de Savoie

⁽²⁾ UMR CNRS 5557 Ecologie Microbienne & Ecole Vétérinaire de Lyon , UCB Lyon1

Résumé

La recherche proposée traite de **la survie et la dynamique des sols aux eaux et à l'échelle du bassin versant, de transfert des contaminants microbiens liés aux pratiques agricoles.**

Notre objet d'étude est la contamination fécale des eaux par le pâturage, en zone de montagne (alpage). L'échelle de synthèse des travaux est l'échelle bassin versant. Le modèle bactérien choisi est *Escherichia coli*, du fait de la valeur indicatrice reconnue de cette espèce vis à vis des modifications de la qualité sanitaire pour l'homme et les animaux de l'environnement aquatique.

Le choix de cette thématique et de ces objets se justifient concrètement par la fréquence des pollutions fécales attribuées à l'agriculture, affectant les aquifères utilisées comme ressources pour l'alimentation en eau potable. Cette question prend une résonance particulière en zone de montagne du fait de l'image de château d'eau de ces territoires, du développement du tourisme en période de ressources en eau limitée (notamment en hiver), de l'importance de l'eau dans l'agro-alimentaires (risque pour les fabrications fermières) ou pour les fonctions récréatives (sports d'eaux vives).

Les enjeux et questions scientifiques associés à ce travail de recherche sont de divers ordres et se rattachent à plusieurs problématiques :

- le comportement environnemental des populations bactériennes d'origine fécale ; on s'interroge sur la structure et l'état physiologique de ces populations, notamment sur leurs mécanismes de survie – adaptation ;

- le transfert du vivant microbien dans les bassins versants ; on s'interroge sur les couplages entre processus biologiques et hydrologiques, les facteurs de contrôle et notamment la reconnaissance des zones contributives ou des espaces tampons.

La démarche du programme intègre des stratégies d'étude et des connaissances issues de l'agro-écologie et de la biologie moléculaire. L'ambition est d'aboutir à des développements opérationnels visant une gestion des espaces pastoraux adaptée aux enjeux de la qualité des eaux. A mi-parcours du programme, nous proposons un premier bilan sur les modalités de transfert des bactéries fécales à l'échelle de la station pastorale et du bassin versant. Nous apportons également des éléments de réflexion sur les perspectives de travail, de synthèse des résultats et de valorisation auprès des structures de développement agricole et de gestion des ressources en eau.

Le **système étudié** se rapporte à un bassin versant pastoral d'altitude, considéré comme une boîte noire où s'opèrent des entrées, transferts, stockages, transformations et exportations des populations bactériennes sous l'effet de phénomènes aussi divers que les déplacements du troupeau, les mouvements d'eau et les compétitions et adaptations biologiques. On enregistre le fonctionnement de ce système au travers de suivis relatifs : (i) aux entrées d'eau (bilan pluie-neige-ETP) et de bactéries (accumulation et répartition des bouses en relation avec le circuit et l'organisation du pâturage, structure des populations bactériennes en relation avec les différents réservoirs d'animaux domestiques ou sauvage source) ; (ii) aux flux de sorties au niveau de sols types (connaissance de l'état hydrique) et à l'exutoire du bassin versant (suivi de débit d'eau, de teneurs en bactéries fécales, diversité des populations transférées). En parallèle, on tente de mieux appréhender le fonctionnement d'un sous-compartiment clé du système bassin versant étudié, le complexe bouse - végétation - sol, avec des mesures relatives à l'évolution des effectifs d'*E. coli*. Les mesures sont réalisées dans les bouses, à différentes profondeurs sous les bouses, ainsi qu'à la proximité de celles-ci. Elles sont reproduites dans différentes stations pastorales, variant entre elles par la nature des sols et la pression pastorale.

A l'**exutoire du bassin versant**, les teneurs en *E. coli* distinguent nettement la période estivale des autres périodes sans activité pastorale. Lorsque les troupeaux sont présents sur l'alpage, les effectifs de bactéries sont élevés (plusieurs log cfu/100 ml), alors qu'on ne dénombre que quelques unités bactériennes en période de fonte des neiges, en automne ou durant l'hiver sous le manteau neigeux. En été, pendant les averses, les concentrations sont particulièrement élevées. Des traçages chimiques et décompositions d'hydrogrammes de crue mettent en évidence que le transfert des bactéries est alors étroitement lié à l'écoulement de réservoirs superficiels (eau de marécages, lames de ruissellement, écoulements hypodermiques). En dehors des périodes de crue, les teneurs moyennes décadaires augmentent assez régulièrement à partir de l'arrivée des troupeaux pour atteindre une valeur maximale vers mi juillet. A partir de cette période, les teneurs baissent régulièrement, ceci malgré la présence continue d'animaux, pour atteindre des valeurs assez faibles en fin de saison pastorale (fin septembre). Ces évolutions suggèrent que durant les périodes d'écoulement de base, les sorties de bactéries proviennent probablement de transferts par advection dispersion au travers d'espaces poraux détritiques, ces derniers étant fortement connectés à la surface des sols en début de saison pastorale, connexion qui s'affaiblit par la suite au fur et à mesure de la dessiccation estivale des sols.

Dans les **stations pastorales** étudiées, les suivis montrent une contamination généralisée et assez constante ($4 \log E.coli/g$ sol) des premiers centimètres du sol (tranche 0-5cm), ceci quelque soit la station pastorale, la proximité des bouses et la période d'observation (été, fonte des neiges, hiver). En profondeur, les effectifs sont par contre relativement bien ordonnés par l'intensité de la pression pastorale et le fonctionnement hydrodynamique des sols. Dans les situations de concentration d'eau ou de confinement, les teneurs sont toujours élevées, alors qu'elles sont faibles ou très variables dans les situations de sols filtrants. Ces éléments nous suggèrent l'existence de deux types de populations bactériennes. Une première serait stabilisée dès la surface, fortement piégée et non susceptible d'être exportée lors des mouvements d'eau. Une seconde correspondrait à une population « contaminante », mise en mouvement lors des périodes de transfert d'eau.

Au total, l'état du système et son fonctionnement nous semble pouvoir être réduit à un nombre assez restreint de paramètres, relatifs à l'extension des zones contributives au ruissellement et aux écoulements hypodermiques, à la vitesse de dessiccation des horizons de surface des sols, au potentiel d'adsorption des bactéries sur la phase organo-minérale des sols. Dans la suite du programme nous tenterons de vérifier ces hypothèses, avec des modélisations « prospectives » portant sur l'extension des zones contributives au ruissellement (modèle source variable) et les transferts en milieu poral avec pulse régressif de contamination.

Un travail spécifique réalisé par le laboratoire d'écologie microbienne permet d'envisager le développement de protocoles pour l'établissement des typologies génétiques et l'étude de l'état physiologique des communautés bactériennes (sélection d'amorces spécifiques et sélectives des gènes de constitution ou de fonction, protocoles d'extraction et d'amplification). Ces éléments étant acquis il restera et ceci est un objectif fort de la suite des recherches, à caractériser le matériel biologique collecté durant les suivis réalisés à l'échelle du bassin versant ou des stations pastorales.

Nous tenterons ensuite une synthèse entre ces approches pour définir les modalités de valorisation des résultats. Elle sera entreprise à partir de l'interface de recherche développement du GIS Alpes du Nord. L'objectif sera d'amener une concertation large avec les acteurs du développement agricole et les gestionnaires de l'eau (Société d'Economie Alpestre de Haute Savoie, Services Alpines des Chambres d'Agriculture, Services Eaux des Conseils Généraux, DDASS) pour organiser une communication auprès des responsables professionnels agricoles et si possible envisager l'ouverture d'un chantier de recherche action, avec mise en œuvre et suivi de changements portant sur la gestion des sols dans les espaces pastoraux.

Contamination des sols

Recyclage des déchets et impact sur les sols

Animateur : J. Masse

Impact à long terme de l'épandage de déchets en agrosystème : site expérimental de la Bouzule

Coordinateur du projet :

Christophe Schwartz

Laboratoire Sols et Environnement, INPL(ENSAIA)/INRA - Domaine de la Bouzule
2, avenue de la Forêt de Haye, BP 172 - 54505 Vandœuvre-lès-Nancy
Christophe.Schwartz@ensaia.inpl-nancy.fr

Participants :

Geoffroy Sere ⁽¹⁾, **Louis Florentin** ⁽¹⁾, **Henri-Philippe Guimont** ⁽¹⁾, **Jean Louis Morel** ⁽¹⁾, **Anne-Marie Charissou** ⁽²⁾, **Marie-José Jourdain** ⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Sols et Environnement, INPL(ENSAIA)/INRA - Domaine de la Bouzule - 2, avenue de la Forêt de Haye, BP 172 - 54505 Vandœuvre-lès-Nancy

⁽²⁾ Groupe IRH Environnement - Service Impact sur les Milieux - 11 bis, rue Gabriel Péri, BP 286 - 54515 Vandœuvre-lès-Nancy

Résumé

1. Introduction

Le programme de recherche initié par l'ADEME en 1996, intitulé "Evaluation des risques écotoxicologiques liés à la valorisation de déchets en agriculture" s'est poursuivi jusqu'en 2006 à l'initiative du Laboratoire Sols et Environnement (ENSAIA-INPL/INRA, UMR 1120) et du Service Impact sur les Milieux (IRH Environnement), avec le soutien de l'ADEME, de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, de la Communauté Urbaine du Grand Nancy, du Conseil Général du Bas-Rhin, de l'INRA et du Ministère en charge de l'Environnement (GESSOL). Il s'agit d'évaluer les risques de transfert des polluants issus des déchets vers le sol, les eaux, les végétaux et la chaîne alimentaire dans un cadre proche des pratiques réglementaires actuelles. En parallèle à l'acquisition de connaissances sur la dynamique des polluants dans le système sol-eau-plante, l'objectif finalisé est alors d'apporter des éléments factuels aux législateurs, aux gestionnaires, à la profession agricole et aux citoyens pour leur permettre de décider avec raison de l'avenir de cette filière. Il s'agit de contribuer à la proposition d'une méthodologie d'évaluation du risque de dissémination des polluants en permettant la confrontation d'effets réels mesurés in situ avec des effets potentiels mesurés au laboratoire par des méthodes chimiques (extractions partielles) ou biologiques (biotests).

2. Un dispositif expérimental *in situ*

Le dispositif expérimental de terrain localisé sur le site du Centre de Référence, Sécurité et Traçabilité des Aliments (Domaine Expérimental de la Bouzule, 54) est constitué de 40 parcelles de 40 m² disposées en 4 blocs. Dans le cadre d'un plan d'épandage réglementaire, les quantités de boues à épandre seraient calculées en tenant compte des besoins agronomiques des cultures. Néanmoins, dans notre cas, les différents déchets et produits dérivés ont été appliqués quatre années à une dose uniforme de 10 t.ha⁻¹.an⁻¹, soit l'équivalent de 1,3 fois la dose réglementairement tolérée sur 10 ans. Ce choix est justifié par la très forte variabilité de fertilité des déchets (boues urbaines liquide et pâteuse, composts de boues urbaines dopés ou non avec des polluants organiques ou des métaux, sous-produits papetiers, cendres de combustion, composts d'ordures ménagères) qui aurait entraîné des doses d'apport très contrastées. Pour éviter les carences nutritionnelles et n'observer que d'éventuels effets toxiques sur les végétaux, une fertilisation minérale uniforme est appliquée à toutes les parcelles. L'itinéraire technique réalisé depuis 1997 et jusqu'en 2006 correspond à des pratiques agricoles classiques.

3. Les effets sur les rendements des cultures

Les effets agronomiques de l'apport des différents déchets et produits dérivés (fertilité des sols, rendements et qualité des cultures) sont suivis après chaque épandage et à chaque récolte. Aucune carence nutritive n'a été observée sur les plantes de grande culture (colza, blé, maïs). Pour certains déchets (boue urbaine liquide et déshydratée) il y a une accumulation d'azote et de phosphore assimilable dans la terre de surface. Dans ce cas, les rendements du colza et du blé sont, en tendance, supérieurs aux rendements obtenus avec une fertilisation minérale optimisée. Néanmoins, des effets ont été mesurés sur la qualité des récoltes (teneurs en protéines, lipides et glucosinolates des graines de colza, qualité boulangère de la farine de blé, valeur nutritionnelle de l'ensilage de maïs pour des vaches laitières). Il n'y a très majoritairement pas de différences significatives entre les qualités techniques des produits végétaux obtenus avec des apports de déchets et sous-produits en comparaison aux pratiques agronomiques classiques. Dans le cas contraire, il faut par exemple remarquer que la sur-fertilisation azotée induite par les apports de boues urbaines dus au protocole, entraîne des phénomènes de verse chez le colza et diminue la teneur en huile au profit de la teneur en protéines.

4. Les transferts de polluants dans le système sol-déchet-eau- plante

L'étude comporte l'acquisition de connaissances sur le devenir des polluants minéraux et organiques (mobilité, biodisponibilité, transferts) et de leurs effets sur le système sol-eau- plante. Ainsi, les flux de polluants vers les végétaux, leur accumulation et leur transfert vers les horizons profonds du profil de sol et les eaux souterraines sont mesurés. Il n'y a pas d'augmentation significative des teneurs en éléments en traces totaux dans les sols, quels que soient les déchets ou compost épandus. Pour l'ensemble des éléments dosés, les concentrations des métaux dans les sols après quatre années d'épandage (neuf cultures successives) sont entre deux et dix fois inférieures aux teneurs limites réglementaires. Dans ces conditions, les épandages cumulés induisent une augmentation de 3 à 33 % des métaux totaux en fonction du déchet ou compost épandus, les valeurs les plus élevées s'expliquant par des teneurs initiales en certains métaux très faibles dans le sol. La concentration en polluants dans les déchets et composts ne renseigne pas à elle seule sur les quantités apportées aux sols. Il convient de signaler que l'apport d'engrais participe également à l'augmentation des stocks d'éléments en traces dans les sols.

Les concentrations en éléments en traces dans les végétaux récoltés sont comparables quelles que soient la culture et le traitement. De plus, la comparaison des concentrations en métaux dans les grains issus des différents traitements et des parcelles témoins ne met pas en évidence de différences significatives. Tous les éléments en traces dosés dans les grains de blé et de colza présentent des teneurs inférieures aux seuils de phytotoxicité et aux propositions de valeurs limites dans les aliments du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France. La très faible exportation des métaux par les récoltes est expliquée par la biodisponibilité réduite des polluants apportés par les déchets et composts. Pour estimer cette biodisponibilité nous avons mis en œuvre des extractions chimiques (pour le cadmium, le nickel, le cuivre, le plomb et le zinc) et des méthodes de dilution isotopique (pour le cadmium et le nickel). Ainsi, par exemple, les teneurs en cadmium extractibles à l'eau des sols restent systématiquement inférieures à 1 % des teneurs totales et diminuent au cours du temps, après arrêt des épandages. Les flux de polluants dans le système sol- plante sont obtenus en multipliant leurs concentrations par les quantités apportées. Pour des oligo-éléments comme le cuivre et le zinc les concentrations mesurées dans les grains sont supérieures aux seuils de carence et les concentrations en éléments métalliques non essentiels sont inférieures aux seuils de toxicité.

La réglementation demande, en complément, le suivi de trois HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et de sept PCB (polychlorobiphényles ou hydrocarbures polycycliques aromatiques chlorés) dans les sols. Ces substances ont été choisies en raison de leur résistance à la dégradation et de leur persistance relative. Dans les sols et les végétaux issus des 40 parcelles, les concentrations en polluants organiques sont très faibles et proches des limites de détection, quel que soit le traitement. Ces teneurs diminuent également avec le temps, après arrêt des épandages.

5. La réponse des biotests

Des tests de toxicité sont réalisés sur les déchets avant épandages, sur des échantillons de terre collectés avant et après épandage et sur des eaux gravitaires collectées après des épisodes pluvieux significatifs. Les tests biologiques de toxicité utilisés (batterie : Daphnies, Algues, Microtox®) permettent d'intégrer l'impact de l'ensemble des polluants contenus dans une matrice solide et/ou son éluat et dans une solution (eaux gravitaires). Les éluats obtenus à partir des composts de boue urbaine, du sous-produit papetier et des cendres de combustion ne sont pas ou peu toxiques alors que ceux générés par la boue liquide ou déshydratée et les composts d'ordures ménagères présentent une toxicité. Ces effets,

constatés au laboratoire, ont été comparés aux effets *in situ*. Les éluats issus des échantillons de terre collectés avant et après épandage des déchets ont été soumis aux mêmes tests biologiques. Aucune toxicité n'a été mesurée après épandage, quel que soit le déchet.

Les tests de toxicité conduits au laboratoire permettent de mettre en évidence le danger toxique potentiel des échantillons, sans tenir compte des caractéristiques réelles de l'épandage (type de sol réceptacle, modification du statut des polluants après incorporation du déchet dans le sol). Lors des essais en laboratoire sur matrices pures et mélanges terre-déchet, une toxicité limitée des matrices pures épandues a été révélée. Cette innocuité des matrices sur les organismes étudiés était encore accentuée sur les mélanges terre-déchet. Ce résultat était pressenti avec les faibles teneurs en polluants minéraux et organiques dosées dans les sols. Les résultats concernant la toxicité à court terme (test Daphnies 24 heures et test Microtox®) ne mettent pas en évidence pas de toxicité pour les eaux gravitaires.

6. Conclusion

L'originalité du projet repose sur (i) la comparaison *in situ* et à long terme entre pratiques agricoles classiques et apports de déchets, (ii) la complémentarité des approches de laboratoire et de terrain à l'échelle du dispositif expérimental, (iii) les effets de l'épandage de déchets sur la contamination des végétaux et sur la qualité technique des produits transformés et (iiii) l'approche prédictive du risque associant biotests, méthodes chimiques et méthodes isotopiques. Les résultats permettent d'une part, de disposer de recul pour l'évaluation du risque des épandages de déchets et produits dérivés, et, d'autre part, de contribuer au développement et à la validation d'outils de diagnostic et de prédiction pour évaluer le devenir des polluants. Ces résultats ont pour implication finalisée de répondre aux questions posées par les acteurs de la filière concernant l'impact à long terme de la valorisation agricole des déchets sur la qualité des sols et la dissémination des polluants vers la chaîne alimentaire.

En l'absence d'impacts environnementaux observés à court et moyen termes, il ne faut pas exclure que la dissémination de polluants ne posera pas des problèmes de qualité des eaux et des aliments à long terme. Une poursuite des travaux de recherche s'impose, afin de valider les conclusions actuelles sur le long terme tout en tenant compte des différentes sources de polluants dans les agrosystèmes.

Il faut noter que les résultats des travaux des 8 premières années ont fait l'objet de la rédaction d'une synthèse. Ce document en cours de finalisation devrait être édité prochainement par l'ADEME. Cette synthèse comporte en particulier une proposition d'approche méthodologique pour évaluer les risques écotoxicologiques *in situ* liés à la valorisation de déchets et sous-produits en agriculture.

Mots clés : *déchets, boue urbaine, boue industrielle, compost, cendre de combustion, épandage agricole, risques, écotoxicologie, qualité des sols, qualité des eaux, qualité des végétaux, expérimentation in situ, long terme*

Conséquences de l'épandage de produits résiduaux organiques sur la qualité des sols et des récoltes : Expérimentation de longue durée de Colmar bilan après 4 ans (2001-2004)

Coordinatrice du projet :

Sabine Houot

INRA, UMR INRA-INAPG Environnement et Grandes Cultures, F-78850 Thiverval-Grignon
Sabine.houot@grignon.inra.fr

Participants :

D. Leclercq⁽¹⁾, D. Montenach⁽¹⁾, C. Maginieu⁽¹⁾, A. Schaub-Tremel⁽²⁾, V. Parnaudeau⁽³⁾, B. Nicolardot⁽³⁾

⁽¹⁾ INRA, Unité d'Expérimentation Agronomique et Viticole, F-68000 Colmar

⁽²⁾ Mission de Recyclage Agricole, F-68000 Colmar

⁽³⁾ INRA, Agronomie F-51000 Reims

Résumé

Le recyclage agricole de produits résiduaux organiques (PRO) d'origine urbaine se justifie par leur valeur agronomique : disponibilité en éléments fertilisants, amendement calcique ou organique, amélioration de la fertilité physique des sols, stimulation de l'activité microbienne. Les diverses crises auxquelles l'agriculture a du faire face récemment ont généré la réticence des agriculteurs face à l'épandage de ces PRO. Les réglementations mises en place pour cadrer cette pratique garantissent l'innocuité à court/moyen terme des épandages. Cependant, l'acquisition de références à long terme sur leurs effets sur la qualité des sols, des récoltes mais également des eaux circulant dans les sols (pouvant avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines) et enfin de l'atmosphère via les émissions gazeuses (gaz à effet de serre, ammoniac) reste nécessaire.

Ces PRO sont avant tout des matières organiques (MO) et vont avoir comme premier effet de modifier la dynamique de la MO dans un sol et toutes les propriétés du sol conditionnées par cette dynamique de la MO (disponibilité en éléments fertilisants, propriétés physiques, activité biologique...). Ces PRO sont également vecteurs de composés traces minéraux et/ou organiques dont le devenir dans le sol est conditionné par leur spéciation dans les PRO, par l'évolution des PRO après apport au sol et plus indirectement par les modifications des propriétés des sols induites par les apports de PRO. La mise en place de sites ateliers, expérimentations au champ de longue durée, dans lesquels toutes les pratiques culturales sont maîtrisées, sont des outils permettant ces acquisitions de références à long terme, la calibration de modèles pour la simulation des effets à long terme de cette pratique d'épandage agricole, la mesure ou recherche de nouveaux paramètres ou composés. Ces sites ateliers doivent être représentatifs de situations réelles d'épandage. Le choix des PRO épandus doit être fait sur la base d'une typologie des PRO épandus basée entre autre sur les caractéristiques de leur MO conditionnant leur devenir dans les sols et le type d'interactions avec les composés traces.

Différents sites expérimentaux de longue durée ont été initiés par différents organismes (cf autres présentations dans la même session). Le site mis en place par l'INRA à Colmar a pour objectifs :

- de caractériser les effets de l'épandage de 3 types de PRO (boue d'épuration urbaine, fraction fermentescible des ordures ménagères, fumier de vaches laitières) sur (1) les flux de composés traces minéraux et organiques dans les sols, les eaux lessivées, les récoltes et le cas échéant, les produits transformés, (2) la dynamique de la MO et des éléments fertilisants ;
- de mettre en évidence l'effet du compostage sur ces impacts. En effet, le compostage est un mode de traitement des déchets organiques qui se développe en particulier pour les boues et les effluents d'élevage. Le compostage permet l'hygiénisation des déchets et facilite l'épandage des PRO. Mais il modifie les caractéristiques de la MO des déchets initiaux et devrait donc modifier le

* Adresse actuelle : GEVES, 87 Lusignan

- comportement des composés traces présents dans les PRO mais également les effets des PRO sur la dynamique de la MO dans le sol recevant les épandages et en particulier la disponibilité des éléments fertilisants.

Le dispositif initié en 2001 pour une durée minimale de 10 ans a une surface de 2,24 ha. C'est un dispositif agronomique avec 4 blocs répétant les différents traitements. Il comprend 48 parcelles de 90 m² chacune. L'essai croise 2 types facteurs :

- facteur 1 : les traitements organiques avec 5 PRO (boue d'épuration urbaine, même boue compostée, compost FFOM issu de la fraction fermentescible des ordures ménagères collectée sélectivement, un fumier de vaches laitières et ce même fumier composté) et un traitement témoin sans apport
- facteur 2 : le niveau de fertilisation minérale azotée. La moitié du dispositif reçoit une fertilisation minérale azotée complémentaire calculée sur la base de la méthode des bilans.

Le dispositif comprend également 6 parcelles de même taille maintenues en sol nu recevant les PRO et 6 parcelles ne recevant pas de PRO mais une fertilisation minérale optimale à l'exception de 2 parcelles changeant chaque année et servant à calculer une année donnée la fourniture du sol en azote.

Les apports de PRO se font tous les 2 ans en début d'année (fin janvier), les quantités apportées se font sur la base de la teneur en N des PRO. L'équivalent de 170 kg N/ha est apporté manuellement à chaque épandage. La succession de culture inclut des cultures représentatives de la région : maïs grain, blé tendre d'hiver, maïs grain, orge de printemps brassicole, maïs grain, blé tendre d'hiver, betterave sucrière, orge de printemps brassicole, betterave sucrière, blé tendre d'hiver.

Les résultats correspondant aux 2 premiers épandages sont présentés.

Les PRO apportés sont conformes aux réglementations (arrêté de Janvier 1998 pour la boue, norme NFU 44 095 pour le compost de boue, norme 44 051 révisée pour les fumiers et le compost FFOM) en terme de concentrations en composés traces métalliques (ETM) et organiques et également en terme de flux de ces composés traces apportés au sol. Ces flux d'ETM représentent à chaque épandage une faible proportion des stocks d'ETM existant dans l'horizon labouré du sol avant le départ de l'expérimentation (0,02 à 1,5% des stocks initiaux, dépendant des éléments considérés). Une campagne d'analyse des eaux de pluie a été réalisée en 2004. Les flux d'ETM apportés au sol via les pluies représentent moins de 10 % des flux correspondant aux apports via les PRO urbains sauf pour le Cadmium où les pluies pourraient apporter des flux du même ordre de grandeur que les PRO. En revanche, les flux d'entrée via la pluie, de certains composés traces organiques comme des polychlorobiphényles (PCB) peuvent être supérieurs à ceux apportés par les PRO.

Après 2 apports, les teneurs en ETM dans le sol n'ont pas changé de façon significative. De même, on n'observe aucune tendance de dégradation de la qualité des grains récoltés : pas d'augmentation des concentrations en ETM par rapport au traitement témoin recevant une fertilisation minérale classique. Les quantités d'ETM exportées du sol via les grains récoltés représentent 0,001 (Cr) à 0,3% (Zn) des stocks initialement présents dans le sol.

Le compostage augmente la stabilité de la MO d'un déchet. Ainsi 30% du C organique de la boue est facilement minéralisable par la microflore du sol ; cette proportion chute à 10% après compostage en raison de la perte de cette MO facilement biodégradable au cours du compostage. Les différences entre fumier et fumier composté sont moins importantes (respectivement 24 et 21% de C facilement biodégradable), en raison de l'intensité plus faible du compostage (en général, 2 retournement et absence d'aération forcée alors que pour le compostage des boues, les retournements sont plus nombreux où l'aération des andains est assurée par aération forcée). Cette stabilisation de la MO au cours du compostage diminue la disponibilité du N dans les composts par rapport aux déchets non compostés. Le coefficient apparent d'utilisation du N du compost de boue est de 25% sur 2 ans (effet direct et arrière effet cumulés) en moyenne pour le compost de boue, de 46% pour la boue non compostée. Environ 10% du N du compost FFOM est utilisé chaque année sans différence entre effet direct et arrière-effet. Les fumiers compostés et non compostés présentent quasiment la même disponibilité de leur azote (19 à 21% cumulés sur 2 ans) confirmant la faible intensité du compostage.

Des bougies poreuses ont permis le suivi de la qualité de l'eau à 140 cm sous les parcelles nues recevant les PRO. Les premiers résultats montrent des pertes en N minéral supérieures en présence de la boue et du fumier par rapport aux autres PRO. Les premières tentatives de modélisation des flux de nitrates dans le sol à l'aide du modèle LIXIM ont été peu concluantes en raison du régime hydrique particulier en Alsace.

En conclusion provisoire, la mise en place de l'essai a confirmé la valeur fertilisante des PRO, la diminution de la disponibilité du N après compostage des déchets. Aucun effet négatif sur la qualité du sol et des récoltes n'est observé à court terme (4 ans) quand les épandages sont conformes à la réglementation. Les mesures se poursuivent afin d'appréhender les effets à plus long terme.

Recyclage agricole des déchets organiques dans les sols tropicaux (Ile de La Réunion) : quel impact sur les transferts d'éléments traces métalliques ?

(Projet en cours, décembre 2004 – décembre 2007)

Coordinateur du projet :

Emmanuel Doelsch

CIRAD, UPR 78 Risque Environnemental lié au recyclage
Station de La Bretagne, BP 20 – 97408 SAINT DENIS
doelsch@cirad.fr

Participants :

Hervé Saint-Macary⁽¹⁾, Frédéric Feder⁽¹⁾, Géraud Moussard⁽¹⁾, Antoine Findeling⁽²⁾, Claire Chevassus-Rosset⁽²⁾, Patrick Cazeville⁽²⁾, Isabelle Basile-Doelsch⁽³⁾, Jean-Yves Bottero⁽⁴⁾, Jean-Marie Garnier⁽⁴⁾, Armand Masion⁽⁴⁾, Jérôme Rose⁽⁴⁾, Stéphane Moustier⁽⁴⁾, Jean-Paul Gaudet⁽⁵⁾

⁽¹⁾ CIRAD, UPR 78 Risque Environnemental lié au recyclage - Station de La Bretagne, BP 20 - 97408 SAINT DENIS

⁽²⁾ CIRAD, UPR78, Avenue Agropolis - 34398 MONTPELLIER Cedex 5

⁽³⁾ IRD, UMR 161 LSTUR, BP 172 - 97492 SAINTE CLOTILDE

⁽⁴⁾ CEREGE, UMR 6635 CNRS-Université Aix-Marseille III - Europôle de l'Arbois BP 80 - 13545 AIX-EN-PROVENCE Cedex 4

⁽⁵⁾ LTHE, UMR 5564 BP 53 - 38 041 GRENOBLE Cedex 9

Résumé

Eléments de contexte

L'île de La Réunion est marquée par une forte croissance démographique qui se traduit par une intensification des activités agricoles, industrielles et urbaines. Il en découle une augmentation de la production de déchets. Le gisement des matières organiques épandables à La Réunion est estimé à 903 000 tonnes. Les effluents d'élevage (633 000 tonnes) constituent le premier gisement de produits organiques, et l'on envisage un accroissement de près de 30 % de ces effluents, en l'espace de 10 ans. Le défi posé à l'agriculture par le problème des effluents d'élevage est bien réel, car les possibilités de valorisation sont limitées par un ensemble de contraintes, liées en particulier aux fortes contraintes topographiques et au mitage important et croissant du territoire. Si les composts ne représentent qu'une faible proportion du gisement des matières organiques épandables à La Réunion (environ 2600 tonnes), il s'agit néanmoins d'une filière en plein essor. En effet, la quasi-totalité des communes réunionnaises prévoient à court terme de se doter de plate-forme de compostage afin de faire face à l'augmentation de la production de déchets verts. L'évolution pédogénétique des sols de La Réunion est contrôlée par le gradient climatique et l'orographie de l'île. Les sols réunionnais cultivés sont acides ($4,5 < \text{pH} < 6,5$) et riches en éléments traces métalliques (ETM). Les concentrations sont supérieures à celles rencontrées à l'échelle de la planète particulièrement pour Cr, Cu, Ni et Zn (Doelsch et al. 2006). Les travaux conduits sur les sols réunionnais soulignent leurs spécificités physiques, chimiques et un fonctionnement différent de celui des sols de climat tempéré.

L'insularité impose de protéger avec une grande attention les différents compartiments sol et eau qui ne sont pas ou peu renouvelables. Or, jusqu'à présent, les études conduites à La Réunion dans le cadre du recyclage des déchets organiques ont essentiellement consisté à caractériser leurs propriétés agronomiques. Aucune étude de l'impact environnemental lié à la présence des ETM dans les sols et les produits épandus n'a été entreprise. Les concentrations élevées des sols de La Réunion en ETM ne favorisent a priori pas la généralisation du recyclage agricole des déchets organiques. En effet, 80% des sols étudiés présentent des teneurs en Ni supérieures à la valeur seuil fixée par l'arrêté du 8 janvier 1998 (55 % des sols étudiés pour Cr) limitant fortement le développement de l'utilisation des boues d'épuration

en agriculture. En ce qui concerne les autres déchets organiques, il n'existe pas de prescription législative limitant leur utilisation en agriculture en fonction des concentrations en ETM des sols. Néanmoins, afin de préserver les ressources sols et eaux qui sont fortement sollicitées dans un contexte insulaire où la surface cultivable est limitée, il est primordial d'évaluer l'impact de pratiques agricoles telles que l'épandage de déchets organiques sur des sols naturellement riches en ETM. Ces pratiques agricoles modifient de manière importante l'état d'équilibre géochimique et biologique du milieu en affectant : le stock et la dynamique de la matière organique ; les flux hydriques ; la composition et les propriétés physico-chimiques (pH, Eh, etc) des solutions du sol ; les propriétés physiques du sol (texture, porosité, infiltrabilité, etc.) ; les populations de la microfaune comme de la macrofaune. L'ensemble de ces évolutions est susceptible de modifier la spéciation des ETM et il est fondamental d'évaluer les risques de transferts de ces éléments entre les différents compartiments environnementaux.

Objectifs

Dans le cadre de ce projet, nous étudions l'impact de l'épandage de déchets organiques sur la spéciation et le transfert des ETM présents dans les sols réunionnais. Il s'agit de :

1. déterminer la spéciation des ETM des sols de La Réunion et son évolution suite à l'apport de déchets organiques ;
2. quantifier la mobilité des ETM entre les différents compartiments : sol, plante, eau et sous-sol;
3. conceptualiser et modéliser les transferts des ETM afin de disposer d'outils de description et de prédiction.

Résultats scientifiques : présentation synthétique

Caractéristiques des sols et déchets étudiés

Trois sols ont été sélectionnés dans le cadre de ce projet afin de représenter la diversité des conditions pédologiques rencontrées à l'échelle de l'île de La Réunion. Il s'agit d'un Cambisol andique (Les Colimaçons, CO) dont la minéralogie est dominée par la gibbsite, l'hallowite et des oxyhydroxydes de fer. Le second sol est un andosol silique (Ste-Rose, SR), riche en $C_{organique}$ (19,3% pour l'horizon 0-25 cm) et dont la minéralogie se caractérise par la présence de minéraux cristallisés à très courtes distances les allophanes/imogolites. Nous retrouvons également de la smectite, de la gibbsite et des oxydes et oxyhydroxydes de fer. Enfin le sol de La Mare (LM) est un nitisol composé de gibbsite, d'hallowite, de kaolinite et d'oxydes et d'oxyhydroxydes de fer. D'une manière générale, les sols étudiés sont acides à faiblement acide. Les sols CO et LM possèdent des $\square pH$ ($pH_{KCl} - pH_{H_2O}$) toujours négatifs exprimant une surface d'échange globalement chargée négativement. Inversement, avec un $\square pH$ positif, le sol de Sainte-Rose semble constitué de colloïdes dont la surface serait chargée positivement. Ces résultats ont été confirmés par la détermination de la CEC et CEA des trois sols.

Nous avons sélectionné deux déchets organiques : le lisier de porc dont le gisement est l'un des plus importants sur l'île et un compost de déchet vert. Le lisier de porc (LP) est riche en carbone et azote ammoniacal. Le compost de déchet vert (CDV) est un produit de consistance solide et riche en carbone. Les deux déchets possèdent un pH basique supérieur à 8.

Incubations des couples sols/déchets

Des incubations de six couples sol/déchet (CO, LM et SR et LP, CDV) ont été conduites à 28°C en conditions normalisées avec des apports de déchets calculés de manière à correspondre à des épandages de 350 et 1000 kgN/ha (résumé par la suite par 350 et 1000 respectivement). Un suivi de l'évolution du pH et de la conductivité électrique (CE) a été effectué pendant les incubations ainsi que des mesures de la minéralisation du carbone. L'évolution des paramètres physico-chimiques n'est pas identique pour les trois sols. C'est pour CO que nous avons noté les variations les plus importantes : diminution du pH et augmentation de CE. A l'inverse, pour SR, les variations du pH et de la CE sont très faibles pendant l'incubation. Les quantités de C-CO₂ provenant de la minéralisation du lisier sont toujours supérieures à celles du compost quelque soit le sol considéré. La minéralisation du C est proportionnelle à la quantité initiale de déchet (350 vs 1000). L'effet sol est plus complexe à expliciter. Le coefficient de minéralisation permet néanmoins de faire ressortir certaines spécificités des sols étudiés car nous observons des différences significatives entre les trois sols :

- à t=28j, coefficient de minéralisation \approx 25 % pour CO+LP 350 ou 1000 ;
- à t=28j, coefficient de minéralisation \approx 16 % pour LM+LP 350 ou 1000 ;
- à t=28j, coefficient de minéralisation \approx 16 % pour SR+LP 350 et \approx 25 % pour SR+LP 1000 ;

La comparaison des coefficients de minéralisation du C permet de penser que la quantité de biomasse microbienne est plus importante pour CO que LM pour lequel la minéralisation est plus faible. Classiquement, la variation de la dose initiale de déchet ne modifie pas le coefficient de minéralisation, ce que nous observons pour CO et LM. Les résultats obtenus pour SR sont surprenants. Pour expliquer la différence du coefficient de minéralisation entre les doses 350 et 1000, nous pensons qu'une interaction forte a lieu entre les constituants organiques et minéraux du sol, interaction qui limite la dégradation de la matière organique apportée. Autrement dit, les constituants amorphes du sol de SR (allophane/imogolite) pourraient créer un enrobage autour de la matière organique apportée ce qui aurait pour effet de la « protéger » vis-à-vis des microorganismes.

Spéciation de la MO

Nous avons tenté de caractériser l'évolution de la matière organique (MO) au cours des incubations sols/déchets en couplant deux techniques spectroscopiques : IRTF et RMN ^{13}C . Les spectres IR des différents couples sols/déchets sont dominés par la présence de bandes minérales ce qui entraîne une observation difficile des liaisons organiques. Des extractions de la MO ont été réalisées et l'analyse a alors portée sur les fractions fulviques ou hydrosolubles et humiques du mélange CO+LP 1000 à t=0j et t=28j. La fraction fulvique est caractérisée par la présence d'acides carboxyliques, de liaisons acides C=O et C-O, de C aliphatiques et de C aromatiques. Sur la fraction humique nous retrouvons les bandes attribuables aux minéraux (halloysite et gibbsite) ainsi que la présence de C aliphatiques, de liaisons acides C=O et de C aromatiques. L'IR ne permet pas de distinguer d'évolution de la MO au cours de l'incubation. La RMN permet d'affiner la description de la composition organique du lisier : 20 % du C détecté correspond à des C-aliphatiques, 50 % à des polysaccharides en C5 ou C6, 10 % à des C-aryls et 6 % à des C=O. Le lisier est donc un matériel organique peu aromatique et peu acide. L'étude par RMN de la fraction hydrophile des mélanges CO+LP 1000 en début et fin d'incubation permet de retrouver la signature du lisier. Toutefois, les différences entre début et fin d'incubation sont mineures, ce qui signifie que la minéralisation du C de la MO hydrosoluble se fait de manière homogène et qu'aucune classe de composés n'est dégradée de manière privilégiée. Les spectres des fractions humiques sont inexploitable ce qui signifie que la MO humique est complexée avec un élément paramagnétique tel que le fer.

Spéciation des ETM

L'objectif de l'étude des phases minérales et des complexes organo-minéraux est de déterminer la spéciation des ETM au sein des sols et son évolution suite à l'apport de déchet. L'étude de la spéciation d'un élément trace au sein d'une matrice aussi complexe qu'un sol ou un déchet n'est pas une chose aisée. Aucune méthode unique n'existe et il est indispensable de croiser les informations. Dans notre cas, nous avons choisi de « trier » au préalable les minéraux et les complexes minéraux en utilisant une méthode de séparation densimétrique pour le sol SR. Dans le cas du chrome, nous avons pu mettre en évidence deux fractions principales qui contiennent près de 90 % du Cr du sol : la fraction la plus dense ($d > 2,9$) qui est dominée par la présence d'oxyde de Fe, Ti et des minéraux primaires (olivine, pyroxène, etc.) et la fraction $2,3 < d < 2,6$ qui est composée de smectite, gibbsite, quartz et allophane/imogolite. Afin d'étudier plus finement la spéciation du Cr dans ces fractions, nous avons utilisé la spectroscopie d'absorption des rayons X. Cette technique a permis de démontrer que cet élément se trouve sous sa forme la moins toxique et la moins mobile : Cr^{3+} . Il est essentiellement présent au sein de minéraux primaires ou néoformés de type oxyhydroxydes. Enfin, nous avons pu estimer que 13% du Cr total pourrait être engagé dans des liaisons avec la MO (Doelsch et al., In press). Autrement dit, l'étude de la spéciation du Cr indique que cet élément au sein de SR sera très peu mobile.

Transfert des ETM

Nous avons construit, en laboratoire, trois colonnes d'un nitisol (LM), pour étudier les impacts d'un épandage de lisier de porc sur la rétention et le flux d'éléments chimiques dans le sol. L'étude s'est poursuivie durant 120 jours pendant lesquels les colonnes ont reçu des apports d'eau réguliers de 200 mm par semaine, ce qui équivaut en fin d'expérimentation à 3 années du régime hydrique annuel sous les conditions climatiques de la Réunion. Le régime hydrique du sol et la composition des solutions de sol ont été suivi en continu à quatre profondeurs (17,5 ; 30 ; 55 et 85 cm) afin de déterminer le fonctionnement hydrodynamique du sol et les flux d'éléments chimiques liés en partie à la minéralisation du lisier de porc épandu. La nitrification rapide du lisier de porc a conduit à une acidification de la solution du sol principalement en surface et à une augmentation de la conductivité électrique à toutes les profondeurs. Les flux de potassium, sodium, calcium, nitrates, chlorures, cuivre et zinc sont différents à la sortie de chaque horizon du sol ce qui montre qu'ils ont un comportement différent. Les flux de lixiviation ont mis en évidence, d'une part, une interaction entre les cations et la phase solide du sol (77% du potassium et 99%

du cuivre et du zinc sont adsorbés par les premiers horizons du sol) et d'autre part, une interaction entre les anions et la phase solide du sol (41% du nitrate et 11% du chlorure sont adsorbés par le premier horizon du sol). Ces résultats mettent en évidence les propriétés spécifiques du nitisol sous des conditions tropicales et la complexité d'évaluer l'impact d'un épandage de lisier de porc en terme de contamination des sols et des nappes phréatiques.

Modélisation

Une première série de tests pour évaluer le modèle PHREEQC a été entreprise. Elles ont été réalisées à l'aide d'expérimentations de colonnes de sol (CO) ayant reçu un épandage de lisier de porc. En premier lieu, la spéciation du lisier n'a été réalisée que pour les espèces chimiques en solution. Or, le lisier étudié présente une MS de 5,25 % et une majeure partie des éléments ne sont pas en solution, notamment pour les ETM. En l'absence de paramètres, nous n'avons pas simulé la minéralisation du lisier en surface de la colonne comme un phénomène cinétique. L'évolution de la MO du lisier induit un effet retard dans la fourniture des éléments minéraux aux cellules sous-jacentes. De plus, le module transport de PHREEQC ne permet pas une prise en compte des alternances d'humectation et de dessiccation puisque le flux est continu. Son utilisation en 1D est donc extrêmement limitée pour une extrapolation à des mesures réalisées par exemple sur le terrain. En revanche, la comparaison de résultats obtenus *in situ* et à l'échelle du batch (sans transport) ou de la colonne de sol reste parfaitement réalisable et fiable.

Doelsch, E., I. Basile-Doelsch, et al. "New combination of EXAFS and density fractionation for the speciation of chromium within an andosol." Environmental Science & Technology **In Press**.

Doelsch, E., V. Van de Kerchove, et al. (2006). "Heavy metal content in soils of Reunion (Indian Ocean)." Geoderma **134**(1-2): 119-134.

Matière organique et Biodiversité

**Matière organique du sol :
effet serre et qualité des sols**
Animateur : J. Ranger

Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés

Coordinateurs du projet :

Eric Blanchart, Martial Bernoux

IRD Montpellier, UR 179 SeqBio – Laboratoire MOST
911, avenue Agropolis, BP 64501 – 34394 MONTPELLIER
eric.blanchart@mpl.ird.fr, martial.bernoux@mpl.ird.fr

Participants :

Frédéric Saudubray⁽¹⁾, André Lassoudière⁽²⁾, Raphaël Achard⁽²⁾, Robert Oliver⁽³⁾, Dominique Arrouays⁽⁴⁾, Sébastien Lehman⁽⁴⁾, Emmanuel Grolleau⁽⁴⁾, Yves-Marie Cabidoche⁽⁵⁾, Jorge Sierra⁽⁵⁾, Bernard Barthès⁽³⁾, Eric Roose⁽³⁾, Corinne Venkatapen⁽⁶⁾

⁽¹⁾ CEMAGREF, UR Agriculture et Espace Insulaire, Martinique

⁽²⁾ CIRAD, FLHOR, Martinique

⁽³⁾ IRD, Laboratoire MOST, Montpellier

⁽⁴⁾ INRA, Unité Infosol, Orléans

⁽⁵⁾ APC, Guadeloupe

⁽⁶⁾ IRD, Laboratoire BOST, Martinique

Résumé

1. Justification du programme de recherche et axes de recherche

Les fonctions environnementales et agronomiques de la matière organique sont bien connues : elle permet le stockage d'éléments nutritifs, l'augmentation de la capacité d'échange cationique, l'amélioration de la stabilité structurale des sols et l'amélioration des activités fauniques et microbiennes du sol. La matière organique intervient également dans le cycle global du carbone C et peut se comporter comme un puits ou une source de gaz à effet de serre vis-à-vis de l'atmosphère. Les études portant sur les déterminants et les niveaux de stocks de matière organique (appréhendés à travers les stocks de carbone) sont donc d'une importance capitale pour évaluer la durabilité des systèmes et leur impact sur l'environnement.

Les Antilles constituent, dans le milieu tropical, un modèle d'étude particulièrement intéressant pour la compréhension des déterminants des stocks de carbone dans les sols, en raison de la grande variété des types de sols et de leurs usages, et de l'importance des gradients climatiques. La demande de références scientifiques de la part des utilisateurs sur le terrain est forte.

Les principaux objectifs de recherche étaient organisés en 5 axes :

Axe 1. Analyse des principaux déterminants édaphiques des stocks organiques des différents sols et effet des grands modes d'occupation de ces terres (échelle parcelle) sur les stocks de C du sol : constitution d'une base de données informatisée (valorisation de données déjà existantes et de données recueillies au cours de ce projet).

Axe 2. Analyse des variantes contingentes de l'itinéraire technique : recherche d'alternatives de gestion des terres en vue d'une séquestration accrue du C dans le sol, dans le cadre d'une agriculture durable.

Axe 3. Conséquences du mode d'usage des terres et/ou des alternatives de gestion sur les propriétés biologiques (diversité et biomasse de la faune) et physiques (stabilité de l'agrégation et érodibilité) des sols.

Axe 4. Spatialisation des stocks actuels de C des sols de la Martinique et de la Guadeloupe et de leur devenir selon différentes alternatives de gestion (depuis l'échelle de la parcelle à celle de la région).

Constitution de banques régionales de données géoréférencées à partir de données existantes (valorisation) ou acquises au cours de ce projet (SIG).

Axe 5. Approche économique du C séquestré pour quelques situations.

2. Principaux résultats et conclusions

Cette étude a permis de préciser les principaux déterminants des stocks de C dans les sols des Antilles. Si la minéralogie et la texture du sol influencent profondément les stocks de C des sols, c'est principalement le mode de gestion des terres et l'itinéraire technique qui déterminent le niveau de C dans les sols. Les mesures de stocks de C sous différents systèmes de culture ont également permis de préciser les potentialités de stockage de C de certains systèmes et les durées nécessaires pour atteindre des niveaux de C élevés. Cette étude a également permis de montrer comment des changements de systèmes de culture ou de pratiques culturales influençaient non seulement les stocks de C (et les formes de carbone) mais également certaines propriétés physiques et biologiques des sols. Enfin, la spatialisation des données a permis de dresser la carte des stocks de C à deux dates (1969/1970 et 1980) ; il aurait également été intéressant d'établir la carte des stocks de C pour l'année 2000 mais les données concernant les surfaces cultivées (RGA, statistiques agricoles) n'étaient pas disponibles à la fin du programme. Enfin la modélisation a permis de spatialiser les stocks de C en fonction de divers scénarios d'évolution des surfaces cultivées.

La valorisation des résultats de cette étude sur les stocks de carbone dans les sols des Petites Antilles a été réalisée à travers notamment :

- l'installation de la carte numérisée des sols de Martinique et la base de données-sols géoréférencées sur le SIG du PRAM (Pôle de Recherche Agronomique de la Martinique) ;
- trois communications orales dans le cadre du congrès international de la Caribbean Food Crops Society (Fort-de-France, juillet 2002 ; Pointe-à-Pitre, juillet 2004) : Venkatapen et al. (2002), Etienne et al. (2002), Barreteau & Blanchart (2004) ;
- L'édition du numéro 4 des Cahiers du PRAM (Pôle de recherche Agronomique de la Martinique), intitulé « Les stocks de carbone dans les sols des Antilles. Importance agronomique et environnementale », préfacé par A.B. Delmas (MEDD) et contenant 8 chapitres présentant les principaux résultats de cette étude. Ces cahiers du PRAM sont destinés à un public de politiques, décideurs, socioprofessionnels de l'agriculture en Martinique, chercheurs, universitaires...
- la formation de sept étudiants : L. Paupelard (DESS Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales, Paris XII, 2001), M. Etienne (ENITA Clermont-Ferrand, 2001), L. Lecurieux-Laferronay (DESS Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales, Paris XII, 2003), S. Maubourguet (DESS Economie et Environnement, Marseille, 2004), A. Ripoche (2^e année INAPG, 2004), C. Salomé (M1 FENEC, Montpellier, 2005) et C. Venkatapen (doctorante UAG).

Impact des pratiques agricoles et sylvicoles sur les variabilités spatiales et temporelles des constituants organiques du sol et de la biomasse microbienne.

Aspects méthodologiques de la surveillance, identification de compartiments fonctionnels, modélisation et généralisation spatiale

Coordinateur du projet :

Dominique Arrouays

INRA, centre d'Orléans, Unité INFOSOL
Avenue de la Pomme de Pin, BP 20619 – 45166 Olivet cedex
arrouays@orleans.inra.fr

Participants :

INRA d'Orléans, Unité INFOSOL
UMR INRA – Université de Bourgogne, Microbiologie des Sols, Dijon
Geosol, Dijon

INRA Bordeaux – Aquitaine, Station d'Agronomie
INRA Bordeaux – Aquitaine, Recherches Forestières, Ecophysiologie et nutrition
GIP Ecofor
INRA d'Avignon, Biométrie
Agriculture Agroalimentaire Canada, Station de recherche sur les Sols et les grandes cultures

Résumé du projet de recherche

On se propose de réaliser une étude de la variabilité spatiale et temporelle des constituants organiques du sol et de la biomasse microbienne, sous l'effet de pratiques agricoles et forestières sur les sols sableux des Landes de Gascogne. On propose de réaliser une analyse géostatistique et une surveillance de l'évolution des teneurs en carbone, en azote et de la biomasse microbienne des sols de plusieurs parcelles soumises à des pratiques contrastées (monocultures de maïs grain irrigué, forêt mixte sans entretien, sylviculture intensive de Pin maritime, coupe rase). Sur des échantillons composites et sur des échantillons représentatifs de la variabilité intraparcellaire on réalisera des fractionnements et une identification chimique de divers compartiments organiques ainsi que des mesures d'activité respiratoire. Les résultats serviront (1) de base méthodologique pour la mise en place de sites de surveillance de la qualité biologique des sols, (2) d'éléments de quantification de l'impact des pratiques agricoles et sylvicoles sur la qualité biologique des sols. Ils seront également utilisés pour le calibrage de modèles mécanistes en cours de construction dans le cadre d'un autre programme.

Restauration de fonctions et propriétés des sols de grande culture intensive : Effets de systèmes de culture alternatifs sur les matières organiques et la structure des sols limoneux, et approche du rôle de la diversité biologique des sols

Le projet Dmostra Diversité biologique-Matières Organiques des sols-STRucture-Agriculture

Coordinatrice du projet :

May Balabane

INRA Unité de Science du Sol – RD 10 - 78026 Versailles

balabane@versailles.inra.fr

Participants :

C. Chenu⁽¹⁾, M. Akpa⁽²⁾, D. Arrouays⁽³⁾, S. Barray⁽⁴⁾, M. Bertrand⁽⁵⁾, J.M. Bodet⁽⁶⁾, Y. Brygoo⁽⁷⁾, F. Bureau⁽²⁾, D. Cluzeau⁽⁸⁾, T. Decaens⁽²⁾, L. Guichard⁽⁵⁾, M. Hedde⁽²⁾, S. Houot⁽⁹⁾, J. Labreuche⁽⁶⁾, K. Laval⁽¹⁰⁾, Y. Le Bissonais⁽¹¹⁾, B. Pawlak⁽⁴⁾, D. Picard⁽⁵⁾, P. Puget⁽¹⁰⁾, P. Saulas⁽⁵⁾

⁽¹⁾ INRA, Unité de Science du Sol, Versailles.

⁽²⁾ Université de Rouen, Laboratoire d'Ecologie.

⁽³⁾ INRA, Unité Infosol, Orléans.

⁽⁴⁾ Université de Rouen, Laboratoire de Microbiologie du Froid.

⁽⁵⁾ INRA-INAPG, UMR Agronomie, Thiverval-Grignon.

⁽⁶⁾ Arvalis-Institut du végétal, station expérimentale de Boigneville.

⁽⁷⁾ INRA Unité de Pathologie et Méthodologie de la Détection, Versailles.

⁽⁸⁾ Université Rennes I-CNRS, équipe EcoBio, Paimpont.

⁽⁹⁾ INRA-INAPG, UMR Environnement et Grandes Cultures, Thiverval-Grignon.

⁽¹⁰⁾ ESITPA de Rouen, équipe BioSol.

⁽¹¹⁾ INRA Unité de Science du Sol, Orléans.

Résumé

Au-delà de leur fonction essentielle de production agricole, les sols ont des fonctions clés à l'échelle globale, et les pratiques de l'agriculture intensive peuvent être la cause d'une dégradation de propriétés déterminantes quant à leur capacité à assurer durablement ces fonctions. Les sols limoneux de grande culture du Nord de la France relèvent particulièrement de cette problématique générale en raison à la fois de la longue durée de leur usage agricole, du caractère intensif des pratiques culturales auxquelles ils ont été soumis, et de leur fragilité intrinsèque liée à leur texture. Dans quelle mesure des systèmes de culture (SdC) alternatifs au système intensif sont-ils à même de restaurer des propriétés des sols qui contribuent à leurs fonctions environnementales? Avec quel temps de réponse ?

C'est dans cette problématique que s'inscrit ce projet avec l'objectif de quantifier les effets de systèmes alternatifs sur les matières organiques et la stabilité de la structure du sol et approcher les effets sur des communautés du sol, microorganismes et lombriciens, et d'améliorer les connaissances sur les facteurs explicatifs des changements des propriétés du sol sous différents systèmes.

Le croisement des connaissances relatives aux évolutions des propriétés des sols sous l'effet de différents modes de gestion avec celles relatives aux SdC dont le choix a de la pertinence eu égard à leur occurrence en situation réelle a fait porter notre choix sur des systèmes caractérisés par l'une et/ou l'autre des pratiques suivantes : simplification du travail du sol, couverture végétale permanente du sol, réduction plus ou moins drastique des intrants, et alternance cultures-prairies. Les situations choisies relevaient d'expérimentations ou de parcelles agricoles d'historique connu, le domaine pédoclimatique étant pour tous celui des sols limoneux du Nord de la France : prairies temporaires de 30 ans (lycée agricole

d'Yvetot), simplification du travail du sol depuis 30 ans (essai Arvalis-IdV, Boigneville), SdC intégré, ou biologique, ou sous couvert végétal sans travail du sol, depuis 5 ans (essai La Cage, INRA, Agronomie Grignon).

Les acquis généraux de ce projet peuvent être déclinés ainsi : (i) l'élaboration d'une méthode de travail transposable, caractérisée par un seul échantillonnage pour tous et une base de données minimum pour grille d'analyse commune, (ii) des développements méthodologiques en biologie du sol, (iii) des quantifications relatives à des SdC peu renseignés, à des cinétiques de différenciation précoces et à des attributs croisés biologie-MO-structure du sol, (iv) une amélioration des connaissances sur les déterminants du stockage de C dans les sols et de la stabilité structurale du sol, et, enfin, (v) un réseau incluant agronomes, biologistes et chercheurs en science du sol, construit via Dmostra et fonctionnant au-delà de ce projet.

Concernant les matières organiques (MO) du sol, les stocks de C mesurés confirment, en référence à Arrouays et al. (2002) (i) des stocks de C relativement bas sous grande culture intensive, (ii) un potentiel de stockage des prairies temporaires intermédiaire entre prairie permanente et culture continue, et (iii) que dans certaines situations, et c'est le cas sur le site de Boigneville, le non travail du sol en tant que tel peut s'avérer stocker peu de C. L'étude apporte pour les prairies temporaires des références supplémentaires sur les cinétiques de stockage-déstockage du C au cours des rotations. Elle apporte enfin des données nouvelles sur des systèmes peu renseignés. L'ensemble des changements de pratiques liés au passage d'un système productif à un système soit intégré soit biologique ne s'est pas traduit, au terme de 6 années, en un changement significatif du stock de C du sol. A contrario, l'ensemble des changements de pratiques liés au passage du même système productif à un système sous couvert végétal sans travail du sol s'est traduit, en 5 ans, en une augmentation du stock de C du sol d'environ 8%.

L'analyse comparative de la réponse du stock de C du sol à la mise soit en prairie temporaire, soit en non travail du sol avec couvert végétal permanent soit en non travail du sol sans couvert végétal permanent nous amène à suggérer que le flux important d'entrées de C au sol jouerait davantage que le non labour en tant que tel dans le stockage additionnel de C observé sous prairies temporaires et sous non travail du sol avec couverture permanente du sol. Six et al. (2000) lient dans un schéma conceptuel relatif au mécanisme de séquestration de C lié au non labour, entrées de C au sol, formation de microagrégats au sein de macroagrégats et renouvellement des macroagrégats. La lecture de nos résultats à la lumière de ce schéma suggère que pour que le non travail du sol soit une pratique stockant du C, il serait nécessaire d'avoir des intrants organiques au sol de nature à impulser une dynamique d'interaction flux de C-agrégation se traduisant par de la protection physique. Cela peut ne pas être le cas lorsqu'une grande culture céréalière menée en labour conventionnel est convertie en la même grande culture mais sans labour, c'est-à-dire lorsque seul le labour différencie les 2 situations. Sur la base, entre autres, de ces éléments d'analyse, nous proposons de considérer que les situations de non travail du sol qui ne stockent pas ou peu de C mériteraient d'être étudiées comme situations modèles au lieu d'être écartées des publications comme cela semble être souvent le cas. L'hypothèse issue de Dmostra est que la variabilité de stockage de C sous non travail du sol est expliquée par le système de culture qui inclut cette pratique, ce dernier déterminant l'effet temporel croisé des entrées de MO au sol et de la protection physique dans la structure du sol.

Le rapport C/N des débris végétaux en voie de décomposition dans le sol s'est avéré plus faible en système de non travail du sol qu'en système labouré, et cela dans le continuum des fractions granulométriques de différentes tailles et temps de résidence dans le sol. Les processus qui peuvent rendre compte de cette observation intègrent des concepts de la dynamique de C et N ainsi que du fonctionnement biologique du sol. Par ailleurs, notre étude indique que l'azote des MO particulières serait un indicateur plus sensible que le carbone s'agissant des changements de fonctionnement du sol sous l'effet de différentes modalités de travail des sols cultivés. L'ensemble pointe la nécessité d'intégrer plus largement les paramètres relatifs à la dynamique de l'azote dans l'évaluation des systèmes de travail simplifié du sol.

Concernant la stabilité de la structure, les résultats acquis dans le cadre de Dmostra, basés sur l'utilisation de tests d'agitation mécanique dans l'eau ou de réhumectation de petits agrégats (méthode Le Bissonnais), montrent que la mesure de la stabilité structurale (et en particulier le test d'immersion qui s'est révélé le plus sensible aux différenciations de comportement structural induite par les systèmes de culture, et aussi le plus robuste par rapport aux variations inter-annuelles probablement liées à la variabilité climatique) est un indicateur sensible et fiable de l'effet des différents systèmes sur le sol, considéré comme un milieu physique « dynamique et instable », c'est-à-dire dont les caractéristiques géométriques et mécaniques varient dans le temps. La pertinence de cette mesure vis-à-vis de la sensibilité du sol à la battance et à l'érosion hydrique, qui sont deux manifestations majeures des

conséquences de cette instabilité, a été démontrée par ailleurs (Legout et al., 2005 ; Le Bissonnais et al. 2006). On observe globalement trois types de différenciations : (i) une évolution faible ou absente de la stabilité (en 6 ans) pour les systèmes intégrés et biologiques, (ii) une augmentation importante de la stabilité, avec des indices de différenciation entre 1,5 et 2 pour le travail superficiel et le semis direct à Boigneville (30 ans) et pour le système sous couvert végétal sans travail du sol (6 ans), et (iii) une augmentation très forte de la stabilité (indices de différenciation > 2) et rapide pour les prairies temporaires. L'amélioration est très rapide et très forte pour les prairies temporaires (dès 2 ans) et pour le système de semis sous couvert à La Cage, alors que l'implantation d'un semis direct ou d'un travail superficiel à Boigneville aboutit à une différenciation plus faible, même en 30 ans. On peut en déduire que l'implantation d'un couvert végétal permanent (caractéristique commune aux prairies et SCV) est plus efficace pour la stabilité structurale que l'absence de travail du sol. Ceci mettrait en avant le rôle des systèmes racinaires et de la rhizosphère dans la stabilité de la structure.

Cette amélioration de la stabilité structurale est toujours corrélée à une augmentation des teneurs en C. Un des meilleurs prédicteurs de la stabilité structurale est in fine le C total de l'horizon considéré, mais avec des valeurs plus élevées, pour une teneur en C donnée, sous prairie que sous culture. Les différentes fractions organiques quantifiées ont des coefficients de corrélation avec la stabilité très proches les uns des autres mais pas meilleurs que le C total. On peut l'expliquer par la diversité des mécanismes et des fractions organiques impliquées, mais aussi par l'interdépendance de ces fractions. Nous n'avons donc pas pu identifier une/des fraction(s) organique(s) spécifiquement plus active(s). Cependant, nos résultats suggèrent que les entrées organiques dans l'horizon considéré, et probablement surtout celles liées à un couvert végétal permanent, seraient le meilleur prédicteur de la contribution des microorganismes et de la faune à la stabilité structurale. Le projet MOST/GESSOL 2 en cours devrait apporter des réponses complémentaires.

De façon générale, enfin, il nous semble que nos résultats permettent d'insister sur le rôle du C comme source d'énergie pour les communautés vivantes du sol, des flux importants de C au sol rendant de ce fait « actives » certaines fonctions du sol plus ou moins « désactivées » dans les systèmes intensifs.

Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols

« MOST »

(Projet en cours)

Coordinatrice du projet :

Claire Chenu

UMR Bioemco CNRS-UPMC -INRA-INAPG-ENS-ENSCP Grignon

Bâtiment EGER - 78850 Thiverval Grignon

chenu@grignon.inra.fr

Participants :

S Abiven, M Akpa, A Amblès, M Annabi, M Balabane, G Bardoux, S Barray, C Beaufreton, M Bertrand, G Bodineau, F Bureau, S Busnot, Carrière, N Carriou, J Célérier, C Rodier, D Cosentino, E Coucheney F Darboux, P Delporte, S Dessaire, O Duval, A Fereira, L Fourrié, C Francou, H Gaillard, C Gangneux, I Gattin, L Guichard, S Houot, K Laval, Y le Bissonnais, M Legras, L Lemée, S Menasseri, JP Pétraud, M Poitrenaud, V Pouteau, JN Rampon, P Saulas, MP Som, D Tessier, B Verbeque

UMR Bioemco (CNRS-UPMC -INRA-INAPG-ENS-ENSCP), Grignon

UMR Environnement et Grandes Cultures, INRA-INAPG, Grignon

UR Science du Sol INRA, Orléans

UMR SAS INRA ENSAR, Rennes

UMR Agronomie INRA-INAPG, Grignon

UR Pessac INRA, Versailles

UR Biosol ESTIPA, Rouen

UMR Synthèse et Réactivité des Substances Naturelles, CNRS-Université de Poitiers

ACTA (Association de coordination Techniques Agricoles), Paris

CREED (Centre de Recherche pour l'Environnement, l'Energie et le Déchet), Limay

Chambre d'Agriculture du Loiret

UR Ecodiv, Université de Rouen

UMR Microbiologie du Froid CNRS-Université de Rouen

Résumé

Parmi les menaces pesant sur les sols et identifiées par la communauté européenne l'érosion et la diminution de teneur en matières organiques (MO) des sols occupent une place importante, menaces qui sont étroitement liées en raison du rôle des matières organiques dans la stabilité de la structure du sol.

La stabilité de la structure est l'aptitude des agrégats du sol à résister à l'action désagrégante de l'eau lors d'épisodes pluvieux. C'est un bon indicateur de la sensibilité des sols à la battance et à l'érosion hydrique et donc une composante de la qualité des sols. Les matières organiques jouent un rôle essentiel dans le maintien et l'amélioration de la stabilité structurale des sols : principal agent d'agrégation des sols de texture sableuse et limoneuse sous climat tempéré ; c'est aussi un constituant des sols qui varie en quantité et en qualité, à l'échelle de quelques années en fonction des pratiques culturales, des systèmes de culture et des modes d'occupation.

Le rôle privilégié des matières organiques dans la stabilité de la structure des sols est reconnu depuis longtemps et a fait l'objet de nombreux travaux; cependant la synthèse des connaissances acquises reste délicate, en particulier du fait de la multiplicité des méthodes de mesure de la stabilité structurale. Le contexte actuel, d'interrogations sur la dégradation des sols, de diversification des systèmes de culture et de questions quant à leurs bénéfices et impacts environnementaux, et de développement de la valorisation agronomique des déchets organiques, met au premier plan la nécessité de disposer d'outils de prévision de l'évolution de la structure des sols en relation avec les matières organiques. De plus, le

développement d'une politique de protection des sols réactualise la question des valeurs seuil de teneur en matières organiques des sols. Celles-ci pourraient être définies, de manière objective, par rapport à des valeurs souhaitées de propriétés des sols comme la stabilité structurale.

Dans cette problématique, les sols limoneux occupent une place particulière : ce sont des sols dont la structure est fragile du fait de leur granulométrie et qui sont souvent pauvres en MO en raison d'une longue histoire de culture intensive. Ce sont donc des sols caractérisés aujourd'hui par des aléas érosifs élevés, pour lesquels il est nécessaire d'évaluer l'impact de pratiques de restauration, par exemple liées à la gestion des matières organiques (apports de MO exogènes) ou ayant un fort impact sur les matières organiques (simplification du travail du sol, choix des systèmes de culture..).

Le projet a pour objectifs de **développer des fonctions prédictives de la stabilité structurale des sols en fonction des matières organiques du sol ou apportées au sol**. Le cadre choisi est essentiellement celui des sols limoneux. Le projet est basé sur la synthèse de travaux antérieurs et sur des expérimentations en réseau réalisées par les différentes équipes ; sa réussite passe donc par une standardisation rigoureuse des méthodes. Une activité méthodologique importante est donc transversale au projet. Le projet, commencé en 2005, est structuré en quatre opérations de recherche :

- Standardisation et développement des méthodes de mesure de la stabilité structurale.
- Construction de fonctions de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques du sol.
- Etablissement de relations prédictives entre stabilité structurale et fractions organiques du sol.
- Construction d'un outil de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO.

Opération méthodologique - Développements méthodologiques sur la stabilité structurale et la mesure de variables biologiques

Une activité d'intercalibration au sein du projet a porté sur les prélèvements et conditionnements de sols et sur les tests de stabilité structurale eux mêmes ; elle conduit à leur standardisation.

Opération 1- Construction de fonctions de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques du sol.

L'objectif est ici d'établir une relation statistique, ou fonction de pédotransfert, entre les caractéristiques constitutives du sol (texture, teneur en C, teneur en carbonates..) et la stabilité de la structure. Une base de données a été constituée (AGRESTA) qui rassemble les caractéristiques et valeurs de stabilité structurale de sols selon des données acquises dans le cadre du programme RMQS, fournies par des participants du projet, ou provenant d'autres sources. La base rassemble aujourd'hui 409 références correspondant à des sols de textures variées. Les modèles de régression linéaire multiple qui ont été développés montrent que le taux de carbone du sol est le régresseur qui a le plus d'influence sur la stabilité structurale ; viennent ensuite le limon grossier, le sable fin et le fer total. Une fonction de pédotransfert est donc d'ores et déjà disponible (Lebugle, 2006). La base AGRESTA est évolutive et la fonction sera affinée dans le cadre du programme.

Opération 2- Etablissement de relations prédictives entre stabilité structurale et fractions organiques du sol.

Lors de changements de système de culture ou de pratique culturale, on observe des modifications de la stabilité de la structure, parfois sans changement de la teneur en carbone des sol, que l'on attribue à des modifications de la qualité des MO. Cependant les données de la littérature sont très fragmentaires dans ce domaine. Six essais de longue durée sur sols limoneux cultivés sont considérés dans lesquels les traitements différenciés correspondent à des systèmes de culture alternatifs (intégré, biologique, semis sous couverts, prairies temporaires) ou caractérisés par des apports de MO résiduaux urbaines. Sur chacun de ces essais nous établissons des relations statistiques entre un certain nombre de variables biologiques et organiques (C-biomasse microbienne, abondance des champignons, teneur en matières organiques particulières, teneurs en polysaccharides, teneurs en substances humiques...) et la stabilité structurale, afin d'identifier les meilleurs descripteurs des variations de stabilité structurale.

Des suivis sur deux de ces essais ont mis en évidence d'importantes variations interannuelles de la stabilité de la structure. L'analyse de l'histoire hydrique récente des parcelles a permis d'expliquer ces variations et des expérimentations en laboratoire ont confirmé une forte interaction entre stabilisation de la structure par les matières organiques et alternances d'humectation-dessiccation (Cosentino et al. 2006 ; Coucheney, 2005).

Opération 3 - Construction d'un outil de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO.

Il s'agit là d'analyser l'évolution temporelle de la stabilité de la structure du sol suite à un apport de matière organiques au sol en fonction des caractéristiques de l'apport. Des travaux récents (Abiven, 2004, Annabi 2005) ont montré que l'apport de résidus de culture de différentes qualités biochimiques et de composts d'origine et de maturité contrastée au sol augmentait temporairement l'abondance et l'activité microbienne du sol et la stabilité de la structure, avec des cinétiques dépendant étroitement de la nature et de la décomposabilité des MO apportées. Des relations quantitatives ont été établies entre la dose de résidus de culture incorporée et la stabilité structurale (Cosentino, 2006). Une standardisation rigoureuse des protocoles opératoires a permis l'agrégation des données, laquelle a montré une forte corrélation entre les variables relatives aux agents agrégeants microbiens (biomasse microbienne, ergosterol et longueur d'hyphes mycéliens, sucres extractibles) et la stabilité structurale, mais peu de hiérarchie entre ces variables. La dynamique de la stabilité structurale suit donc étroitement la dynamique de décomposition des matières organiques apportées, via le développement des décomposeurs microbiens. Un effet direct des MO apportées sur la structure est présent avec des composts mûrs (Annabi 2005) et est attribué aux substances humiques (Peltre, 2006). Une approche mécaniste de la stabilité de la structure a mis en évidence l'effet des développements microbiens sur l'hydrophobie des sols, mais aussi sur leur cohésion

Deux démarches de modélisation ont été développées pour prévoir l'évolution temporelle de la stabilité structurale : (i) le développement d'une fonction statistique corrélant caractéristiques biochimiques des résidus incorporés et facteurs de forme de la cinétique de stabilité structurale (Abiven, 2004) et (ii) le couplage entre un modèle prédictif de la décomposition des matières organiques CANTIS et une fonction statistique reliant biomasse microbienne, minéralisation du C et stabilité de la structure (Cosentino, 2006). Ces deux démarches seront comparées sur des expérimentations en cours dans le projet.

Projet « Racine-C » : Evaluation (caractérisation, quantification, potentiel) de la source racinaire de carbone pour la gestion et la modélisation des matières organiques des sols

(Projet en cours)

Coordinateur du projet :

Jérôme Balesdent

INRA Aix en Provence. UR Géochimie des Sols et des Eaux
Europole méditerranéen de l'Arbois, BP 80 – 13545 Aix-en-Provence cedex 04
Jerome.Balesdent@aix.inra.fr

Participants :

INRA Clermont-Ferrand, Equipe fonctionnement et gestion de l'écosystèmes prairial; ENITAC Clermont-Ferrand

INRA-ENSAIA-INPL Nancy, Equipe rhizosphère

INRA Aix en Provence. UR Géochimie des Sols et des Eaux.

CEA-CNRS-Univ Aix-Marseille, Cadarache : Laboratoire d'Ecologie Microbienne de la Rhizosphère et des environnements Extrêmes. Groupe des Recherches et d'applications en phytotechnologies.

Résumé

Les matières organiques sont une composante majeure, gérable, de la qualité des sols. Certains travaux avancent que le carbone d'origine racinaire en est la source principale (Rasse et al. 2005 *Plant and Soil*; Balesdent et Balabane 1996 *Soil Biol. Biochem.* 28, 1261). La rhizodéposition est la libération directe de carbone organique dans les sols par les racines vivantes. Il s'agit d'exsudats, de mucilages, de parois, de cellules corticales et de la coiffe. Ce flux est décrit dans la littérature internationale comme variant de 4 à 30% de la production primaire (Nguyen, *Agronomy*, 2003). Ce flux de carbone de l'atmosphère au sol est le poste le moins connu du cycle terrestre du carbone, en raison des difficultés de mesure de flux et de caractérisation des composés. Les flux de rhizodéposition ne sont pas clairement quantifiés, et encore moins caractérisés chimiquement, ce qui en fait un verrou pour la modélisation du carbone des sols. Egalement, la productivité primaire souterraine est évoquée pour expliquer la différence de stockage de carbone organique entre les systèmes prairiaux et les grandes cultures. En systèmes prairiaux, la différence de production souterraine et la nature des litières souterraines entre les graminées est évoquée pour expliquer la différence de stockage de carbone organique au sein des différents modes de gestion.

Quels sont les facteurs de variation du flux souterrain de carbone ? Quelle est sa contribution aux matières organiques des sols ? Peut-on gérer ce flux ?

Les objectifs détaillés

Le présent projet vise à répondre à un ensemble de questions nouvelles sur cette problématique. *La première série de questions* concerne l'effet de premier ordre de la rhizodéposition sur la réserve de carbone des sols. Il s'agit d'abord de *quantifier les flux* de carbone rhizodéposé et leurs facteurs de variations. Ensuite de *déterminer le devenir* des produits rhizodéposés : les produits sont-ils transitoires ou rémanents dans les sols ? La démarche est ici de déterminer *la nature des composés* et leur cinétique de décomposition à moyen terme, à des fins de modélisation. Pour les graminées prairiales, la production carbonée souterraine sera mise en relation avec la stratégie adaptative des espèces. Plusieurs agrosystèmes modèles sont choisis : cultures de blé, colza, maïs, systèmes prairiaux à gestions contrastées. *La seconde série de questions* concerne l'effet de deuxième ordre de la rhizodéposition sur la réserve de carbone des sols, via les effets dits de *priming*, c'est à dire les effets indirects de la production organique rhizosphérique sur la minéralisation des matières organiques préexistantes dans les sols. Une des hypothèses est une surminéralisation due à l'induction de l'activité enzymatique et à la stimulation de populations dégradantes (Fontaine, .. Cet effet serait impliqué dans la stratégie d'acquisition des éléments nutritifs du sol. Les réponses à ces questions sont élaborées sous forme de modélisations et d'éléments de modélisation.

Les démarches et techniques spécifiques

Le projet est mené en collaboration étroite entre quatre équipes proposant chacune des méthodes spécifiques et complémentaires de marquage isotopique, d'analyse isotopique moléculaire, d'analyse des biotransformations du carbone, ainsi que des agrosystèmes modèles étudiés par ailleurs.

Les équipes font systématiquement appel au *traçage isotopique du carbone* photoassimilé et transloqué vers les racines. Il s'agit d'utiliser du CO₂ marqué au carbone 13, soit à 100% sur des temps courts (pulse chasse), soit en faible marquage sur des temps plus longs (marquages continus), soit sur des mésocosmes avec sol reconstitué, soit sur des monolithes de prairie. L'isotope 14C est utilisé également pour des doubles marquages spécifiques.

La détermination de la nature des rhizodépôts est obtenue par une méthode innovante d'analyse moléculaire du carbone marqué par couplage de chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse isotopique (Derrien et al., 2004 Rapid Comm. Mass Spectrom. 17, 2626). L'analyse statistique des stocks de C souterrain de différents modes de gestion prairiale est une autre approche intégrée pour la paramétrisation des modèles.

Quelques résultats acquis en première année (2006)

Les flux de rhizodéposition des plantes cultivées annuelles s'élèvent plutôt à 3-12% de la photoassimilation qu'aux 10-30% de la littérature. Ces informations ont été obtenues par marquages pulse-chasse au ¹³CO₂ de maïs, blé, tournesol, colza; En première approximation, le flux est très dépendant de l'espèce.

Les rhizodépôts sont en majorité des sucres, où prédomine le glucose. Ces sucres sont engagés dans des polymères excrétés ou pariétaux. La libération de sucres libres est minoritaire. Ces informations ont été obtenues de l'analyse des flux de carbohydrates dans la rhizosphère de blé.

Les sucres simples (exsudats) libérés dans le sol sont biodégradés très vite dans le sols. cependant la production microbienne (rendement d'assimilation) est élevée et une partie des produits microbiens formés est assez rémanente à moyen terme. Le carbone des exsudats est donc finalement aussi rémanent à moyen ou long terme que les résidus végétaux.

Quelques résultats et sorties attendus en 2007-2008

Une première mesure de l'effet des litières racinaires et des exsudats sur la minéralisation des matières organiques en système de graminées (Incubation de litières racinaires de *F. ovina* et *L. perenne* et/ou présences de plantes entières marquées au 13C, introduction d'exsudats artificiels marqués 14C, mise en place de prairies contrastées en chambres de marquage de longue durée).

Le projet propose deux types de modélisations

D'une part une modélisation facilement opérationnelle. Il s'agit de l'incorporation de la rhizodéposition dans les modèles conventionnels de C des sols. Cette modélisation comprend la description des rhizodépôts et des hydrates de carbone (flux, allocation, facteurs de variation, devenir) dans le cadre du modèle RothC.

D'autre part une modélisation plus prospective, de nouvelle génération, sur la base de stratégies écologiques est élaborée. Il s'agit ici d'un modèle spécifique de carbone « souterrain » des graminées. Les sorties seront des flux couplés de carbone et d'azote dans un écosystème prairial en dynamique (sol-peuplement herbacé pérenne)

Enfin le projet produira une évaluation des différents systèmes de gestion prairiale sur les flux et la décomposabilité des litières racinaires. Ces trois sorties principales seront traduites en potentiel de gestion des matières organiques du sol via le flux de carbone souterrain.

Evaluation et modélisation des flux de protoxyde d'azote (N₂O) d'origine agricole.

Mise au point d'une méthode d'évaluation des émissions à l'échelle d'une petite région agricole intégrant l'effet du type de sol et des pratiques agricoles

Coordinateur du projet :

Jean-Claude Germon

UMR Microbiologie et Géochimie des Sols, CMSE, INRA/Université de Bourgogne
17 rue Sully, BP 86510 - 21034 Dijon Cedex
JC.Germon@dijon.inra.fr

Participants:

Pierre Cellier⁽²⁾, Micheline Deboux⁽³⁾, Odile Duval⁽⁴⁾, Benoit Gabrielle⁽²⁾, Patricia Garnier⁽²⁾, Catherine Henault⁽¹⁾, Karima Khalil⁽⁵⁾, François Lafolie⁽⁵⁾, Patricia Laville⁽²⁾, Bruno Mary⁽³⁾, Bernard Nicoullaud⁽⁴⁾, Pierre Renault⁽⁵⁾, Guy Richard⁽⁴⁾, Jean Roger Estrade⁽⁶⁾

⁽¹⁾ INRA, UMR Microbiologie et Géochimie des Sols, 17 rue Sully, 21034 Dijon Cedex

⁽²⁾ INRA, UMR Environnement et Grandes Cultures, 78850, Thiverval Grignon

⁽³⁾ INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Péronne, Rue Fernand Christ, 02000 Laon

⁽⁴⁾ INRA, Unité de Science du Sol, BP 20619, 45166 ARDON Cedex

⁽⁵⁾ INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

⁽⁶⁾ INRA-INA PG, Laboratoire d'Agronomie, 78 850 Thiverval Grignon

Résumé

Ce programme engagé en 1999 avait plusieurs objectifs : i) apporter des données nécessaires pour l'évaluation des émissions de N₂O par l'agriculture à partir de mesures d'émissions sur des régions agricoles importantes et représentatives du territoire français ; ii) déterminer le rôle de facteurs liés au sol dans la régulation de ces émissions ; iii) proposer et évaluer une méthode d'évaluation des émissions à une échelle régionale prenant en compte la variabilité des paramètres de régulation liés au sol et aux pratiques culturales. Les travaux ont été conduits dans deux contextes agronomiques différents (La Picardie d'une part, la Beauce Chartraine d'autre part) et ont été structurés autour de 2 axes principaux :

- i) l'analyse de l'effet de la structure du sol sur l'intensité des émissions de N₂O, développée par les équipes de Laon et d'Avignon ;
- ii) l'évaluation des flux de N₂O à l'échelle agronomique avec la mise au point d'un modèle opérationnel de prévision des émissions et une démarche d'application spatialisée du modèle permettant une évaluation des émissions à une échelle régionale, par les équipes de Dijon, Grignon et Orléans.

Dans les deux démarches la paramétrisation et la validation de modèles, plus mécanistes dans le premier cas, et à visée opérationnelle dans le second, ont été une composante forte des travaux réalisés.

Les orientations développées par les équipes de l'INRA de Laon et d'Avignon ont eu pour objectif initial d'introduire l'état structural du sol comme paramètre du déterminisme des sols à la production de N₂O. Elles se sont appuyées pour cela sur un dispositif expérimental en zone de grande culture en Picardie, sur le domaine INRA d'Estrée-Mons en Chaussée. Les parcelles de ce dispositif sont soumises à des pratiques culturales qui engendrent des tassements plus ou moins marqués et génèrent en proportion variable des mottes de sol de porosité fortement réduite (mottes Δ). Les travaux réalisés ont notamment permis de souligner les points suivants :

- les mesures *in situ* sur les parcelles de Mons en Chaussée ont montré :
 - o la faiblesse des émissions de N₂O dans ce type de sol, avec des flux maximum observés de 12 g N ha⁻¹ j⁻¹ et des flux moyens de 1 à 2 g N ha⁻¹ j⁻¹
 - o une contribution réelle et limitée de la nitrification à ces émissions sauf dans les 2-3 semaines qui suivent un apport important d'engrais ammoniacal
 - o l'absence de différence significative d'émission de N₂O entre sol à structure "aérée" et sol à structure "dégradée". Cette absence d'effet structure est paradoxale et ne peut être expliquée que par une analyse plus fine des activités microbiennes.
- le travail expérimental sur le fonctionnement des mécanismes mis en jeu, conduit dans le cadre de la thèse de Karima Khalil a porté sur l'évaluation de la contribution de la nitrification et de la dénitrification à ces émissions :
 - o il a montré que la vitesse de nitrification et la proportion de N₂O émis par unité d'azote nitrifié dépendent fortement de la pression partielle en O₂ : la quantité de N₂O émise par quantité d'azote nitrifié est multipliée par 7 lorsque la concentration en O₂ passe de 20.5 à 1.4 % et est ainsi passée de 0.16 à 1.07 % de l'azote nitrifié avec le sol utilisé.
 - o il a conduit à proposer un modèle de simulation de la réduction de NO₃⁻ en N₂O et de N₂O en N₂ basé sur des cinétiques Michaëlis-Menten ; il prend en compte le caractère inductible de la N₂O réductase et permet de reproduire les cinétiques expérimentales de production de N₂O seulement si l'on tient compte d'une synthèse de la N₂O réductase par certains dénitrifiants et d'un accroissement corrélatif de la capacité de la microflore à réduire N₂O
 - o la régulation de la production et de la consommation de N₂O au niveau de la microflore a conduit à l'idée d'une concentration d'équilibre au voisinage immédiat des microorganismes dénitrifiants, qui serait de l'ordre de 1 à 2 ppm dans le sol utilisé. Cette concentration limite est un élément déterminant dans la régulation des flux d'émission à la surface des sols, qui dépendent alors des caractéristiques des transferts gazeux de ces sols. A partir des flux mesurés une évaluation des coefficients de diffusion apparents a pu être réalisée.
- Ces travaux conduisent à un examen critique des méthodes d'évaluation actuelle des émissions de N₂O et soulignent le rôle de la structure du sol non pas sur les caractéristiques de production de N₂O mais sur celles de transfert, et par voie de conséquence sur l'intensité des émissions.

Les travaux développés par les équipes de l'INRA de Dijon, Grignon, et Orléans ont cherché à mettre au point un modèle d'évaluation des émissions à l'échelle de la parcelle cultivée dans un premier temps puis une méthodologie d'application spatialisée du modèle dans un second temps, permettant une évaluation des flux de N₂O sur des entités territoriales définies à une échelle régionale. Cette démarche a reposé sur l'intégration des principaux paramètres de régulation accessibles au plan agronomique. Les travaux ont été développés selon quatre orientations :

- la mise au point d'un modèle d'émission de N₂O qui a permis de souligner l'intérêt de prendre en compte et de distinguer les contributions respectives de la dénitrification et de la nitrification. La démarche s'est déroulée en quatre étapes :
 - o la validation d'un modèle de dénitrification (NEMIS) proposé antérieurement, réalisée à partir d'un jeu de données acquis sur une précédente situation expérimentale (Hénault et Germon, 2000).
 - o la proposition et la validation d'un indicateur expérimental permettant d'évaluer la proportion d'azote émise sous forme de N₂O au cours de la dénitrification (Hénault et al., 2001)
 - o la mise en évidence des émissions de N₂O liées à la nitrification et la définition d'une relation quantitative entre ces émissions et l'azote nitrifié (Garrido, Hénault et al, 2000 et 2002)
 - o l'intégration des émissions par dénitrification et nitrification dans un même modèle (NOE) validé à la fois sur un jeu de données acquis dans le cadre de ce programme sur 3 situations expérimentales contrastées en Beauce, sur 3 jeux de données acquis antérieurement dans d'autres régions, et sur un jeu de données tirées de la littérature américaine (US Tragnet Database), soulignant le caractère extrapolable d'un tel modèle (Hénault et al., 2005).

- le couplage du modèle d'émission de N₂O au modèle de cultures CERES. L'utilisation du modèle NOE nécessite la disponibilité de données quotidiennes concernant notamment l'état hydrique du sol et la disponibilité en azote minéral. Le couplage de CERES et de NOE permet d'utiliser certaines données de sortie du premier modèle comme données d'entrée du second. Ce modèle CERES a été adapté pour la simulation des bilans environnementaux (Gabrielle et al., 2002). Il inclut trois sous modules relatifs (1) au transfert de masse et de chaleur, (2) aux bio-transformations du carbone et de l'azote dans le sol et (3) à la croissance des plantes. Des ajustements méthodologiques ont dû être réalisés prenant notamment en compte l'épaisseur des couches de sol sur lesquelles sont effectuées les modélisations et l'évolution différenciée des paramètres de régulation au sein de ces couches : ainsi les estimations de flux à partir d'une moyenne des valeurs calculées sur deux horizons (0-10 et 10-20 cm) sont beaucoup plus conformes aux observations que celles calculées à partir des paramètres moyennés sur un horizon 0-20 cm, qui conduit à une importante surestimation des émissions. L'application du modèle CERES-NOE aux jeux de données obtenues lors de la campagne de mesures de terrains sur les 3 sites expérimentaux a entraîné des corrections de paramètres qui permettent un ajustement satisfaisant des sorties du modèle aux valeurs mesurées expérimentalement (Gabrielle et al., 2006).
- une évaluation des émissions de N₂O sur la région étudiée à l'aide de la méthode IPCC, destinée à servir de base de comparaison pour d'autres modes d'évaluation. Cette méthodologie repose sur l'évaluation des différentes contributions à la fourniture d'azote sur l'ensemble du territoire considéré et sur l'application de facteurs d'émission à ces différents compartiments azotés. Les informations nécessaires à cette évaluation ont été collectées et les émissions sur la sole de céréales dans les 3 zones différenciées ont été évaluées. Le mode de calcul conduit à des émissions moyennes assez semblables dans les 3 situations : ces valeurs ont servi de base de comparaison avec celles obtenues par l'application spatialisée du modèle CERES - NOE.
- l'application du modèle couplé CERES-NOE (ou CERES - EGC) à l'échelle régionale a été réalisée ; elle s'appuie sur un système d'information géographique et sur la définition d'entités spatiales au comportement défini à partir du type de sol, des itinéraires techniques appliqués aux cultures (de céréales dans le cas présent) et des données climatiques disponibles. Elle a permis une évaluation des flux de N₂O sur les 3 zones préalablement définies en Beauce Dunoise, Beauce Chartraine et Faux Perche, couvrant près de 200 000 ha. Une procédure de spatialisation des données a été définie et un important travail d'élaboration de bases de données a été réalisé, intégrant à la fois des paramètres physico-chimiques, des données de pratiques agricoles (fertilisation azotée) et des paramètres de fonctionnement biologique des sols. L'évaluation des émissions à l'échelle régionale fait ressortir plusieurs conclusions importantes:
 - o les émissions estimées à l'aide de ce modèle appliqué à l'échelle des petites régions conduit à des valeurs de 10 à 70 % inférieures à celles évaluées à l'aide de la méthodologie proposée par l'IPCC ; les facteurs d'émission directe évalués à cette échelle régionale (0.07 à 0.33 %) sont beaucoup plus faibles que la valeur de 1.25 % recommandée dans cette méthodologie.
 - o les émissions calculées à l'échelle régionale à partir de ce modèle apparaissent faiblement influencée par le niveau de fertilisation azotée et sont sous le contrôle principal des paramètres biologiques régulant la dénitrification et la proportion de N₂O émise au cours de cette transformation, la densité apparente du sol dont dépend étroitement le taux de saturation en eau, et la teneur du sol en azote minéral à l'automne. La faible influence du niveau de fertilisation azotée sur l'intensité des émissions semble pouvoir être expliquée par le fait que les émissions estimées sont apparues relativement peu importantes au cours des périodes suivant la fertilisation azotée. Par contre la possibilité d'émissions significatives en automne à partir de sols relativement riches en azote minéral conduit à souligner l'intérêt des mesures visant à limiter la concentration du sol en azote minéral résiduel à cette période.
 - o l'évaluation des émissions réalisée apparaît fortement conditionnée par les conditions climatiques et culturales dans lesquelles les expériences et les simulations ont été réalisées. La prise en compte de la variabilité interannuelle apparaît une suite nécessaire à cette approche.

Ces conclusions confirment largement la nécessité de la prise en compte des paramètres liés au sol, et plus particulièrement ceux concernant son fonctionnement microbiologique et son fonctionnement hydrique, dans les modèles d'évaluation des émissions de N₂O à une échelle régionale, et dans la définition de stratégies de gestion des systèmes cultivés qui ont pour objectif de réduire ces émissions.

Liste des publications associées au programme

Equipes de Dijon, Grignon, Orléans

Articles

- Gabrielle B., Roche R., Angas P., Cantero-Martinez C., Cosentino L., Mantineo M., Langen-siepen M., Hénault C., Laville P., Nicoullaud B., Gosse G. 2002. A priori paramétrisation of the CERES soil-crop models and tests against several European data sets. *Agronomie*, 22, 119-132.
- Gabrielle B., Laville P., Duval O., Nicoullaud B., Germon J.C., Hénault C., 2006 . Process-based modeling of nitrous oxide emissions from wheat cropped soils at the sub-regional scale. *Global Biogeochemical Cycles*, in press
- Gabrielle B., Laville P., Hénault C., Nicoullaud B., Germon J.C. 2006. Simulation of nitrous oxide emissions from wheat cropped soils using CERES. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74, 133-146
- Garrido F., Hénault C., Gaillard H., Germon J.C., 2000, Inhibitory capacities of acetylene on nitrification in two agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 1799-1802.
- Garrido F., Hénault C., Gaillard H., Pérez S., Germon J.C., 2002. N₂O and NO emissions by agricultural soils with low hydric potentials. *Soil Biol. Biochem.*, 34, 559-575.
- Germon J.C., Hénault C., Garrido F., Reau R., 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N₂O à l'échelle agronomique. *C.R. Acad. Agri. Fr.* 85, 6, 148-162.
- Germon J.C., Hénault C., Cellier P., Chèneby D., Duval O., Gabrielle B., Laville P., Nicoullaud B., Philippot L., 2003. Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) d'origine agricole : évaluation au niveau du territoire français, *Etude et Gestion des Sols*, 10, 315-328.
- Hénault C., Chèneby D., Heurlier K., Garrido F., Perez S., Germon J.C., 2001. Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate soils with potentially high levels of N₂O emission on the field scale. *Agronomie*, 713-723.
- Hénault C., Germon J.C., 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 257-270.
- Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoullaud B., Germon J.C., Cellier P., 2005. How to combine soil data from a soil N₂O emission database to predict "in situ" soil N₂O emission. *Global Change Biology*, 11, 115-127

Communications dans congrès

- Garrido F., Hénault C., Germon J.C. 1999. Nitrous oxide emissions by soils with low water contents. IN (Transactions of the 10th Nitrogen Workshop. The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark. Vol 1. II14, 2p (poster).
- Garrido F., Hénault C., Perez S., Germon J.C., 2000. N₂O and NO emission through nitrification in soils. Annual Meeting Am Soc Agron., Crop Sci. Soc. Am, Soil Sci. Soc. Am, Minneapolis, Minnesota, USA , 5-9 novembre 2000 (poster).
- Garrido F., Perez S., Hénault C. 2000. Les émissions d'oxyde nitrique (NO) au cours de la nitrification dans les sols agricoles. Journée thématique : sols et gaz impliqués dans l'effet de serre. AFES. Paris. 30 novembre 2000 (communication orale).
- Germon J.C., Hénault C., Garrido F., Reau R., 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N₂O à l'échelle agronomique. Colloque « Bilan et Gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural », Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement, Paris, 18-19 mai 1999 (communication orale et texte intégral).
- Hénault C., Garrido F., Chèneby D., Germon J.C., Laville P., Gabrielle B., Cellier P., Duval O., Nicoullaud B., Bruand A. 2000. Les émissions de protoxyde d'azote dans différentes situations agronomiques :

mécanismes en jeu, régulation et simulation à l'échelle agronomique. Journée thématique : sols et gaz impliqués dans l'effet de serre. AFES. Paris. 30 novembre 2000 (communication orale).

Mémoires d'étudiants

- Garrido F., 2000. Les mécanismes de production d'oxydes d'azote (N₂O et NO) par les sols en conditions aérées. Thèse Université de Bourgogne, 143p et annexes
- Quilbé R., 1998. Développement d'un modèle de bilan hydrique en relation avec les risques d'émission du protoxyde d'azote (N₂O). D.E.A Université Paris VI, 37p.

Equipes d'Avignon et Laon

- Garnier P., Debroux M., Richard G., Renault P., Boizard H., Roger-Estrade J., Mary B. 2001. Measurement of nitrous oxide fluxes under different cultural practices in a silty loam. *Annual meeting of the Soil Science Society of America*, Charlotte NC (USA), octobre 2001, poster.
- Khalil K., Renault P., Mary B. 2001. Progressing ability of soils to reduce nitrous oxide: comparison between models and experiments. *Annual meeting Soil Sci. Soc. America*, Charlotte (USA), octobre 2001, poster.
- Khalil K. 2003. Emissions de N₂O par nitrification et dénitrification à l'échelle de la motte de sol: effet de la structure du sol, de l'aération et des activités microbiennes. Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 224 pp.
- Khalil K., Renault P., Mary B. 2003. Denitrification with progressing ability of soils to reduce nitrous oxide: comparison between models and experiments. *7th ESA Congress, Cordoba (ESP), July 2002*.
- Khalil K., Mary B., Renault P. 2004. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. *Soil Biol. Biochem.*, 36: 687-699.
- Khalil K., Renault P., Mary B., 2005. Effects of transient anaerobic conditions in the presence of acetylene on subsequent aerobic respiration and N₂O emission by soil aggregates. *Soil Biol. Biochem.*, 37, 1333-1342.
- Khalil K., Renault P., Guerin N., Marey M., 2005. Modelling denitrification including the dynamics of denitrifiers and their progressive ability to reduce nitrous oxide: comparison with batch experiments. *Eur. J. Soil Sci.*, 56, 491-504
- Richard G., Renault P., Garnier P., Debroux M., Boizard H., Roger-Estrade J., Mary B. 2003. Change in N₂O emissions due to compaction of a silty loam soil. *16th ISTRO Congress, Brisbane (AUS)*, 6 pp., poster.

Matière organique et Biodiversité

Effet des pratiques culturelles sur la biodiversité

Animatrice : L. Jocteur-Monrozier

Développement d'un indicateur de qualité des sols basé sur la macrofaune – Essais sur un site pollué par des éléments en traces

Coordinateur du projet :

Patrick Lavelle

UMR 137 BIOSOL IRD-Universités de Paris VI, VII et XII, Centre IRD
32, avenue Henri de Varagnat – 93143 Bondy Cedex
lavelle@bondy.ird.fr

Participants :

Nuria Ruiz Camacho, Johanne Nahmanni, Jocelyne Roman, Jean-Pierre Rossi

UMR 137 BIOSOL IRD-Universités de Paris VI, VII et XII, Centre IRD, Bondy

Résumé

Des bioindicateurs synthétiques de la qualité des sols basés sur l'étude des peuplements de macroinvertébrés ont été mis au point suivant une procédure en quatre étapes :

1. L'échantillonnage de la macrofaune suivant une méthode de terrain standardisée sur un gradient de pollution métallique et d'intensification agricole dans la région de Mortagne du Nord (Nord de la France) (14 sites), et un ensemble de sites cultivés de la Beauce ayant reçu divers traitements organiques (site INRA de Grignon)(11 traitements répliqués trois fois);
2. L'identification des invertébrés à l'échelle des grands groupes (33 familles, ordres ou groupes fonctionnels) et des espèces (ou morphoespèces) et la mise au point de clés d'identification simples.
3. La comparaison des peuplements et leur distribution en groupes significativement différents par analyse multivariée et/ou analyse hiérarchique ; la validation des partitions ainsi réalisées avec celle des paramètres du sol par des analyses de co-inertie ;
4. la recherche de taxons indicateurs (familles ou espèces) par l'indice Indval de Dufrene et Legendre (1996).

Deux études de cas ont permis de tester et d'affiner les diverses étapes de cette méthodologie dans des situations très différentes

Dans les sols de grande culture du dispositif INRA de Grignon groupant des sols soumis à divers types d'apports organiques et inorganiques, les analyses multivariées montrent une bonne réponse de la macrofaune aux conditions du sol. Les analyses de coïnertie montrent, en particulier une bonne relation avec les paramètres chimiques et physiques du sol. Dans ces sols, l'absence d'une coïnertie significative entre les variables issues des spectres NIRS (Near Infra Red Reflectance Spectrometry) et la macrofaune du sol indique probablement que la faune est plus sensible aux effets physiques de la matière organique (effets sur le régime hydrique, création d'abris en surface...) qu'à leurs effets trophiques. Parmi les 33 taxons (ordres et familles) testés par l'indice IndVal, une dizaine montrent une réaction significative à l'état du milieu et permettent de caractériser certains groupes comme les larves de Diptères sensibles à la fertilisation azotée ou les Coléoptères témoins de l'existence d'un effet litière. Parmi les divers amendements organiques testés, les ordures ménagères grises, riches en débris inorganiques (verre, plastique) et en métaux lourds, se sont avérées les plus favorables au développement d'une faune abondante et diversifiée en raison des abris (effet litière) et de la qualité de la matière organique fournis.

Dans les sols du Nord de la France, la faune s'est également montrée très sensible aux diverses perturbations, travail physique du sol, pollution métallique et type de végétation, ce que traduit une analyse de coïnertie significative. Le long d'un gradient de pollution, où les teneurs totales en zinc, plomb et cadmium varient de 77 à 35000, de 40 à 8270 et de 1 à 190 ppm, la richesse spécifique des macroorganismes du sol semble être plus fortement influencée par le travail mécanique des sols que par la pollution, avec une richesse spécifique minimale rencontrée dans les champs cultivés (21 espèces) et maximale dans les sites boisés (126 espèces). L'indice IndVal a permis d'isoler 21 morphoespèces parmi les 339 récoltées, considérées comme des indicateurs fiables de divers aspects de la qualité des sols. La plupart de ces espèces sont indicatrices des sites non pollués et leur absence indique donc une pollution; seules deux espèces de diplopedes et une espèce de gastéropode sont caractéristiques des peupleraies sur sols pollués. Aucune espèce n'est apparue comme indicatrice du site le plus pollué.

Nous proposons maintenant d'étendre cette méthodologie à un ensemble large de sols représentant les principales situations rencontrées sur le territoire français, pour proposer une liste précise de taxons indicateurs que l'on validera sur un échantillon indépendant. Une fois établie cette liste, on pourra envisager deux alternatives :

- la mise au point d'un système d'indication dichotomique comparable à l'indice de la Qualité Biologique des eaux ;
- le calcul d'indices synthétiques des diverses composantes de la qualité des sols (physique, trophique, toxicologique...) en combinant les densité des divers groupes d'invertébrés suivant leur contribution aux facteurs de qualité extraits par les analyses factorielles.

Effet de polluants sur la composante microbienne de la qualité des sols : méthodes utilisables en routine pour l'analyse de la taille, de la structure, de la densité et de l'activité de communautés microbiennes des sols.

Coordinateur du projet :

Rémi Chaussod

UMR 1229, Microbiologie et Géochimie des Sols, INRA/Université de Bourgogne,
17 rue Sully, BP 86510, 21065 DIJON cedex
remi.chaussod@dijon.inra.fr

Participants :

D. Cheneby, G. Laguerre, F. Martin-Laurent, R. Nouaïm, L. Philippot, L. Ranjard, G. Soulas.

UMR 1229, Microbiologie et Géochimie des Sols, INRA/Université de Bourgogne, 17 rue Sully, BP 86510, 21065 DIJON cedex

Résumé

La gestion durable des sols nécessite le développement de méthodes d'évaluation de la qualité des sols, notamment de sa composante biologique. Dans ce contexte, l'une des préoccupations principales concerne l'évaluation de l'impact de contaminations métalliques (métaux lourds) et/ou organiques (pesticides), principalement issues des pratiques agricoles, sur la qualité biologique des sols. Dans une perspective « opérationnelle » visant à estimer ces effets sur des communautés microbiennes fonctionnelles remplissant un rôle clef dans le fonctionnement des sols, nous avons mené des travaux selon trois axes complémentaires :

1- Développement méthodologique

Des méthodes quantitatives et qualitatives ont été développées en vue d'une utilisation en routine pour juger de la qualité microbiologique des sols. Un effort particulier a porté sur les méthodes bio-moléculaires, notamment pour ce qui concerne l'extraction de l'ADN microbien directement à partir du sol et les mesures subséquentes : analyse de la structure des communautés (B-RISA et F-RISA), détection et quantification de gènes fonctionnels (*atzC*, *nirK*, *nodC*...). Pour assurer une cohérence à toutes les étapes, depuis les prélèvements de sol au champ jusqu'aux mesures de laboratoire, les aspects liés à l'échantillonnage ont également été abordés. La variabilité spatio-temporelle a été étudiée pour quelques indicateurs dans des conditions de champ.

2- Application à des situations de terrain

Diverses méthodes développées au cours de ce programme de recherche et potentiellement utilisables comme indicateurs ont été appliquées à des situations de terrain contrastées : expérimentations agronomiques avec des traitements très contrastés en un même lieu, ou bien parcelles d'enquête ou sols plus ou moins contaminés d'une même région mais intégrant d'autres sources de variation. Ceci a permis de mettre en évidence l'intérêt et les limites des méthodes testées. Les méthodes bio-moléculaires s'avèrent être performantes complétant utilement les mesures quantitatives globales en apportant des informations fines sur des communautés microbiennes (structure et densité) jouant un rôle clef dans le fonctionnement du sol. Toutefois, l'interprétation de ces données reste parfois délicate et nécessite le développement de référentiels d'interprétation.

3 - Mise en place de référentiels d'interprétation

La comparaison de traitements contrastés en un même lieu par une approche polyphasique est opérationnelle. Elle nécessitera toutefois l'acquisition de données supplémentaires permettant de déterminer une ligne de base des variations des paramètres biologiques qui à terme permettrait d'appréhender, en conséquence, l'importance de l'impact des pratiques agricoles sur la composante biologique de la qualité des sols. En revanche, la comparaison de données issues de parcelles plus ou moins éloignées, intégrant différentes sources de variation, s'avère plus délicate. On peut en partie résoudre cette difficulté en mettant en place des référentiels régionaux stratifiés par type de sol et par système de culture. Un travail important d'acquisition et de développement de nouveaux concepts reste à accomplir en ce domaine.

Modifications des pratiques agricoles et impacts environnementaux : Vers un meilleur couplage de la dynamique des Communautés microbiennes du Sol, des Matières Organiques du Sol et des Flux de carbone et d'azote dans les sols (COSMOS-FLUX)

(Projet en cours)

Coordinateurs du projet :

Sylvie Recous

INRA UR 1158 Agronomie Laon-Reims-Mons

recous@laon.inra.fr

Xavier Le Roux

Université de Lyon 1, UMR Ecologie Microbienne

leroux@biomserv.univ-lyon1.fr

Participants :

X .Leroux, E. Attard et collaborateurs ⁽¹⁾, S. Recous, B. Nicolardot et collaborateurs ⁽²⁾, C. Rumpel, MF Dignac ⁽³⁾, A. Chabbi, G. Lemaire, F. Gastal, et collaborateurs ⁽⁴⁾, M. Balabane⁽⁵⁾, F. Laurent⁽⁶⁾

⁽¹⁾ UMR 5557 Ecologie Microbienne CNRS-Lyon I- INRA

⁽²⁾ UR 1158 INRA Agronomie Laon-Reims-Mons

⁽³⁾ UMR 7618, INRA-CNRS-INA PG-ENS BioemCO, Thiverval-Grignon

⁽⁴⁾ Unité UEPEF-INRA et UR Lusignan

⁽⁵⁾ UR Science du Sol, INRA Versailles

⁽⁶⁾ Arvalis-Institut du Végétal

Résumé

Objectifs et résultats attendus de l'étude

Les pratiques agricoles actuelles sont caractérisées par des changements de mode d'occupation et de gestion des sols liés à des décisions socio-économiques à court terme. Un des verrous majeurs pour bien prédire les modifications des impacts environnementaux associés aux flux de Carbone (C) et d'Azote (N) et de la qualité des sols associée en réponse à ces changements de modes d'occupation/gestion est notre compréhension de la nature et de l'intensité du couplage flux-microorganismes-Matières Organiques des sols (MOS). Le projet COSMOS-FLUX vise, sur des situations concrètes de changements de pratiques agricoles, à étudier comment les caractéristiques des MOS (quantité et qualité), celles des communautés microbiennes édaphiques (diversité, effectif, activité), et les flux de C et N associés répondent à un changement de pratiques culturales. Ce problème est abordé lors des perturbations que sont (i) les remises en culture de prairies temporaires et/ou les remises en végétation prairiale de sols cultivés et (ii) le labour de sols non travaillés temporairement ou durablement. L'étude de la réponse des communautés microbiennes et processus aux perturbations, permet de mieux comprendre les couplages-découplage entre les facteurs, les acteurs et les flux résultants, et apprécier *in fine* les propriétés de résistance et résilience des sols et agro- et écosystèmes aux changements de mode d'occupation et de gestion des sols.

Les résultats attendus du projet sont, du point de vue scientifique (i) l'explicitation des interactions flux-microorganismes-MOS dans les sols; (ii) l'acquisition de données sur des variables d'état (taille de compartiment, nature des populations microbiennes) et des flux, sur des dispositifs de longue durée. Les données acquises alimenteront une base de données qui sera mise à disposition de la communauté scientifique notamment dans le cadre de l'Observatoire de Recherche en Environnement (O.R.E.) PCBB; (iii) l'amélioration des connaissances sur les effets des pratiques sur le devenir des MOS, les émissions de gaz à effet de serre et la lixiviation des nitrates; (iii) l'amélioration de modèles de dynamique C/N

permettant de prédire les évolutions des matières organiques dans une diversité de conditions pédo-climatiques et culturales et à court et long terme.

Sites retenus et méthodes

Concrètement, nous avons retenu deux sites d'étude offrant des situations réelles et critiques de modifications de pratiques agricoles posant la question du devenir de la qualité des sols :

- Le premier site (domaine INRA de Lusignan, l'un des sites de l'ORE 'Prairie, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité', PCBB) correspond à des situations de basculement entre gestion du sol pour des cultures annuelles céréalières et gestion du sol pour des prairies temporaires semées. Sur ce site 4 situations permettant d'évaluer l'impact de l'introduction de prairies temporaires assolées dans les systèmes de cultures arables : mode d'occupation pérenne en prairie; cultures annuelles, mise en culture de parcelles auparavant en prairie, implantation de prairie sur des zones auparavant utilisée pour la culture.

- Le deuxième site (essais de longue durée de Boigneville, Arvalis Institut du Végétal) correspond à une situation où l'on a différencié pendant 14 ans les modes de travail du sol et de restitution organique, et où l'on regarde aujourd'hui le résultat de cette différenciation à travers un certain nombre de variables (stocks de carbone et qualité des MOS, état structural, minéralisation de l'azote) ou de processus. Deux situations « à l'équilibre » (travail, non travail depuis 15 ans) et deux situations de changement de pratiques (i.e. labour de parcelles non travaillées, et arrêt de labour sur des parcelles travaillées) ont été retenues dans ce site.

Les expérimentations menées sur ces essais se sont organisées autour de trois approches :

- *une approche in situ* permettant de suivre à court et moyen terme (0-3 mois) les effets des perturbations majeures sur les stocks (C et N organique), les flux nets d'azote et de carbone dans les sols (minéralisation, stabilisation), vers l'atmosphère (CO₂), vers l'hydrosphère (nitrate).

- *un suivi dynamique (0, 3 semaines, 3 mois, 6 m, 1 an, 2 ans) de l'évolution des caractéristiques des sols* (i) des matières organiques, tant du point de vue quantitatif que du point de vue qualitatif (C et N total et dans les fractions particulaires et minéralisées, biomasse microbienne, fractions solubles), (ii) de l'état des communautés microbiennes du sol clé impliquées dans les cycles de C et de N (communautés microbiennes hétérotrophes totales, dénitrifiantes et nitrifiantes en termes d'effectif, structure/diversité et activités potentielles et semi-potentielle (structure de la communauté totale par outils de biologie moléculaire ciblant la communauté bactérienne totale (RISA_b, par ex) et/ou la communauté fongique totale (RISA_f), structure des communautés dénitrifiantes et nitrifiantes par application d'outils de biologie moléculaire ciblant des gènes de fonction clé (e.g. nirK et nirS pour les dénitrifiants ; norA pour les nitrifiants) et donc les groupes fonctionnels correspondant.

- *un suivi dynamique des activités microbiennes potentielles*, sur les mêmes échantillons de sol et aux mêmes dates : respiration, nitrification, dénitrification, minéralisation brute, organisation brute par incubation in vitro et ajouts de substrats.

Premiers résultats

Prairies/Cultures

Comme attendu, les différences dans les caractéristiques des sols maintenus sous prairies et les sols cultivés sont importants: le système prairial conduit, dans l'horizon de surface occupé par le peuplement et ses racines, à une accumulation de C organique, une augmentation du C soluble, de la biomasse microbienne totale, des flux de minéralisation-organisation et de la dénitrification potentielle, comparé au sol sous grande culture. Les structures génétiques des communautés microbiennes (totale, dénitrifiante) sont aussi significativement différentes. Le retournement de la prairie induit à court terme des flux de minéralisation nette de C et d'azote très importants (respiration du sol, production de nitrate) liés conjointement au retournement du sol et à la destruction du couvert. A ces flux sont associés à très court terme des modifications de quasiment toutes les variables suivies dont les valeurs s'apparentent alors aux systèmes cultivés, excepté la nitrification. Une réponse rapide et synchrone est observée pour la dénitrification potentielle, la biomasse microbienne, les flux bruts de minéralisation et d'organisation de l'azote (trois mois après le retournement de prairie). En effet, le retournement de prairie correspond à une forte perturbation : le système prairial initialement peu perturbé, voit ses conditions environnementales brusquement modifiées par un labour qui va notamment entraîner une oxygénation du sol et un enfouissement de matériel végétal, source de matière organique. Les variables environnementales

/trophiques sont alors fortement affectées. Dans le cas de l'implantation de la prairie, le scénario observé est radicalement différent et un an après son implantation, la grande majorité des variables mesurées ne se distingue pas significativement de la situation restée en culture. Planter une prairie sur une ancienne culture ne correspond pas à court terme à un intense changement des conditions environnementales : initialement labouré, fréquemment fertilisé, le sol voit ces perturbations annulées ou réduites. Cette cinétique lente qui se manifeste sur la structure génétique des communautés bactériennes et par l'absence de réponse des autres variables nous amène donc à prévoir de poursuivre le suivi, au moins pendant 2 ans après le changement de gestion dans le but d'augmenter les probabilités d'observer un effet de l'implantation de prairie.

Labour/Non travail du sol

Le non travail du sol (différenciation effectuée pendant 14 ans) se distingue du labour par une différenciation spatiale verticale forte, avec une accumulation de C organique total significativement plus élevée dans l'horizon de surface (0-5cm), à laquelle sont associés un accroissement du C soluble, de la biomasse microbienne, de la dénitrification potentielle et des structures génétiques des populations microbiennes significativement différentes. L'horizon sous-jacent (5-20cm) n'est pas significativement différent pour ces deux traitements pour aucune des variables. L'essentiel de l'effet de l'abandon du labour est donc lié à un très fort gradient conférant à la couche la plus superficielle des propriétés physiques, chimiques et biologiques très différentes de ce qu'elles sont en système labouré. Les premiers résultats obtenus lors de l'application des perturbations montrent que le labour d'une situation auparavant non labourée provoque à court terme une production accrue de CO₂ (effet physique du travail du sol) mais peu d'effet sur la minéralisation nette d'azote. Dans cette situation les variables concernant les pools organiques et microbiens ainsi que les flux bruts et potentiels varient rapidement pour rejoindre le niveau observé dans la situation labourée, ceci principalement en relation avec la perturbation physique et la dilution du sol de cette couche superficielle dans la couche sous-jacente. Pour la situation d'abandon du labour, la 'perturbation' s'apparente, comme pour l'implantation de prairie, plutôt à un « abandon de perturbation » (travail du sol) et on prévoit une évolution plus lente des caractéristiques biologiques et chimiques.

Premières conclusions

Les premiers résultats montrent (i) une réponse synchrone des composantes microbiennes et des flux de minéralisation, organisation, dénitrification, associés aux formes et à la disponibilité du C dans les sols; (ii) dans un certain nombre de cas une évolution asynchrone des activités potentielles et de la diversité des communautés microbiennes qui pourra être analysée lors de l'obtention de l'ensemble des résultats en biologie moléculaire (PCR quantitative); (iii) une dissymétrie forte dans les effets de changements de mode de gestion et d'occupation, la destruction d'une prairie ou le labour représentant des perturbations majeures affectant à très court terme (jours à quelques semaines) l'ensemble des composantes biologiques, physiques et chimiques comparés à l'abandon du labour ou l'implantation d'une prairie (années).

Co-financements

Le doctorat de E. Attard est cofinancé par l'INRA et par la région Poitou-Charentes. Le projet a été cofinancé par l'ACI ECCO PNBC en 2004-2005

