

Les matières organiques du sol : rôles, risques et enjeux

Colloque de restitution du programme
GESSOL 2
Paris - 4 décembre 2008

Recueil des interventions

Colloque organisé par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de
l'Aménagement du territoire et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie



Remerciements

Le MEEDDAT et l'ADEME remercient les auteurs pour leur contribution à cette publication

Coordination et organisation du colloque

Pour le MEEDDAT

Marion Bardy

Le Conseil scientifique du programme GESSOL dans son ensemble
et plus particulièrement

Dominique King et Martial Bernoux

Pour l'ADEME

Antonio Bispo et Adeline Pillet

Pour le MAP

Didier Rat

Contact:

Marion BARDY

marion.bardy@developpement-durable.gouv.fr

01.42.19.17.17

Illustrations de la couverture : © Laurent Mignaux – MEEDDAT

Avant propos

En raison de leur position d'interface dans l'environnement, les sols jouent un rôle éminent dans les grands cycles biogéochimiques et le devenir des substances polluantes. Ils constituent un véritable système écologique, habitat d'une proportion importante de la biomasse continentale et réservoir d'une biodiversité considérable. Les sols sont également le support des activités humaines qui vont de l'agriculture aux infrastructures urbaines et industrielles. Dans le domaine de l'agriculture ainsi que de la sylviculture, les sols sont le support trophique de la production végétale et un déterminant essentiel de la sécurité alimentaire et de la production de biomatériaux. A ce titre, et tenant compte de leur caractère non renouvelable à échéance des générations humaines, les sols constituent un patrimoine dont la gestion durable doit s'imposer comme une préoccupation nationale et internationale forte (*extrait de l'introduction de l'ouvrage de synthèse du programme*)

Conscient des pressions croissantes sur les sols et du manque de recherches coordonnées sur les fonctions environnementales des sols, dès 1998, le Ministère en charge de l'environnement a mis en place le programme GESSOL (fonctions environnementales des sols – GESTion du patrimoine SOL), premier programme de recherche spécifiquement consacré aux sols ayant pour ambition d'intégrer toutes les fonctions du sol. L'objectif du programme GESSOL est de proposer des outils de gestion et des indicateurs pour la connaissance de l'évolution des sols et la mise en place de systèmes de surveillance. Ce programme a fait l'objet d'un premier appel à propositions de recherche (APR) en 1998, proposant quatre axes d'étude:

- qualité des sols : critères et méthodes d'évaluation ;
- processus de dégradation : causes, intensité, prévision ;
- usage des sols : gestion et maîtrise des impacts ;
- aspects sociaux, économiques et politiques.

En 2003, un second APR (GESSOL 2) a été publié, ciblant plus spécifiquement les deux axes suivants :

- influence des pratiques agricoles sur la qualité des sols et leur gestion durable (gestion des matières organiques, fonctionnements biologiques, méthodes de protection des sols, devenir des composés biotiques et abiotiques dans les sols) ;
- influence des pratiques agricoles et sylvicoles sur les transferts et la qualité des eaux souterraines.

Lors d'un colloque en novembre 2006, le Ministère en charge de l'environnement et l'ADEME ont organisé une première restitution des travaux réalisés entre 1998 et 2002 afin de diffuser et de promouvoir les recherches menées dans le cadre du programme GESSOL ainsi que leurs applications.

Ce second colloque est l'occasion de présenter, aux chercheurs et aux gestionnaires, les résultats des recherches menées depuis 2005 dans le cadre de l'APR GESSOL 2 mais également l'ouvrage de synthèse du programme et ses nouvelles orientations. La table ronde finale permettra de discuter de l'importance des matières organiques pour le fonctionnement du sol, et également d'apporter des éléments sur le rôle du sol dans le changement climatique.

Instances du programme

Le programme est doté de deux instances : un Comité d'orientation et un Conseil scientifique

Le Comité d'orientation

Il est composé de représentants des directions du ministère chargé de l'environnement et de ses établissements publics (DIREN, Agences de l'Eau...), de représentants d'autres Ministères et d'autres groupes d'intérêt (associations, élus, professionnels...). Il a pour missions de définir les orientations du programme, de déterminer les propositions de recherche prioritaires suite à l'évaluation scientifique réalisée par le Conseil scientifique et d'accompagner les actions d'animation, d'évaluation et de valorisation du programme.

Président :

Le Chef du Service de la Recherche du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

Institutions représentées :

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (CGDD, DGALN, DGPR),

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (DGPAAT, DGER),

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche,

Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement (CORPEN),

Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), département ARDESO,

Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA),

Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA), DiVE,

Groupement d'Intérêt Scientifique Sol,

Office National des Forêts (ONF),

Association Française pour l'Etude des Sols,

Observatoire des Sols Vivants,

France Nature Environnement.

Le Conseil scientifique

Il est composé d'experts dans les disciplines concernées par le programme. Il a pour mission de formaliser les priorités exprimées par le Comité d'orientation sous forme d'appels à propositions de recherche, d'expertiser les réponses et de proposer et mettre en œuvre des actions d'animation, d'évaluation et de valorisation du programme.

Président :

Dominique KING - INRA,

Membres :

Anne Véronique AUZET - CNRS,
Enrique BARRIUSO - INRA,
Martial BERNOUX - IRD,
Jacques BERTHELIN - CNRS,
Philippe BILLET - Université de Bourgogne,
Eric BLANCHART - IRD,
Winfried BLUM - Université de Vienne (Autriche),
Ary BRUAND - Université d'Orléans,
Claire CHENU - AgroParisTech,
Claude COMPAGNONE - ENESAD,
Stephane DE CARA - INRA,
Cécile DELOLME - ENTPE,
Gilles GRANDJEAN - BRGM,
Gilles GROLLEAU - INRA/ENSAM,
Pierre-Alain JAYET - INRA,
Catherine KELLER - Université d'Aix-Marseille,
Patrick LAVELLE - IRD,
Gérard MONEDIAIRE - Université de Limoges,
Luca MONTANARELLA - Commission Européenne – DG JRC (Italie),
Christophe MOUVET - BRGM,
Jean-Charles MUNCH - Université de Munich (Allemagne),
Naoufel MZOUGHFI - INRA,
Jacques RANGER - INRA,
Agnès RICHAUME - Université Lyon1,
Christophe SCHWARTZ - ENSAIA,
Véronique SOUCHERE - INRA,
Siobhan STAUTON - INRA,
Luc THIEBAUT - ENESAD,
Christian WALTER - Agrocampus Ouest.

Animation scientifique

Elle a été confiée à l'ADEME, et est assurée par Antonio BISPO, Laetitia CITEAU et Adeline PILLET.

PROGRAMME

- 13h30 – 14h** **Accueil**
- 14h – 14h30** **Ouverture**
Eric Vindimian, Chef du Service de la Recherche du MEEDDAT
Dominique King, Président du Conseil scientifique GESSOL
- 14h30 – 15h10** **Stratégie thématique pour la protection des sols : implications en termes de recherche sur les sols**
Ciro Gardi - Commission européenne – DG JRC
- 15h10-15h25** **La matière organique des sols - introduction**
Martial Bernoux, IRD
- 15h25 – 16h30** **Présentation des résultats des projets GESSOL 2**
- Recyclage agricole des déchets organiques dans les sols tropicaux (Ile de la Réunion): quel impact sur les transferts d'éléments traces métalliques ?
Emmanuel Doelsch
- Pratiques pastorales et qualité microbiologique des eaux : rôle des facteurs édaphiques et hydrométéorologiques dans la survie et le transfert à l'échelle bassin versant, de populations de bactéries fécales bovines (PASTOR) - *Jean-Marcel Dorioz*
- Modification 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 (COSMOFLUX) - *Sylvie Recous, Xavier Le Roux*
- La source racinaire de carbone pour la gestion et la modélisation des matières organiques des sols (Racine_C) - *Jérôme Balesdent*
- 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 (MOST) - *Claire Chenu*
- Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement (DST): impact, prévision, prévention, suivi, cartographie - *Guy Richard*
- 16h30 – 16h50** **Pause**
- 16h50 – 17h50** **Table ronde et discussions**
Irène Félix, Arvalis – Institut du végétal
Blaise Leclerc, ITAB
Jérôme Mousset, ADEME
- 17h50 – 18h00** **Conclusions**
Eric Vindimian, Chef du Service de la Recherche du MEEDDAT
Dominique King, Président du Conseil scientifique GESSOL
- 18h00** **Cocktail**

SOMMAIRE

- Les matières organiques du sol **p. 13**
- Recyclage agricole des déchets organiques dans les sols tropicaux (Ile de la Réunion) : quel impact sur les transferts d'éléments traces métalliques ? – *Emmanuel Doelsch* **p. 17**
- Pratiques pastorales et qualité microbiologique des eaux : rôle des facteurs édaphiques et hydrométéorologiques dans la survie et le transfert à l'échelle bassin versant, de populations de bactéries fécales bovines (PASTOR) – *Jean-Marcel Dorioz* **p. 23**
- Modification 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 (COSMOFLUX) – *Sylvie Recous et Xavier Le Roux* **p. 29**
- La source racinaire de carbone pour la gestion et la modélisation des matières organiques des sols (Racine_C) – *Jérôme Balesdent* **p. 35**
- 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 (MOST) – *Claire Chenu* **p. 41**
- Détérioration physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement (DST) : impact, prévision, prévention, suivi, cartographie – *Guy Richard* **p. 47**

Les matières organiques du sol

*D'après l'ouvrage de synthèse du programme GESSOL :
Gestion durable des sols, aux éditions Quæ*

À la mort des végétaux et des animaux, les matières organiques s'accumulent dans le sol et y subissent des transformations physiques, chimiques et surtout biologiques. En effet, les organismes du sol utilisent les composés organiques comme ressource nutritive et leur font subir des transformations physiques (fragmentation) et biochimiques (minéralisation et humification) qui aboutissent à la création de matières organiques plus ou moins complexes. Les organismes vivants du sol et ces composés organiques transformés constituent les matières organiques du sol. Cette fraction est en continuel renouvellement.

DYNAMIQUE DES MATIERES ORGANIQUES DANS LES SOLS

Dans les sols, les matières organiques n'ont pas le même temps de résidence selon leur **composition biochimique** ; il peut aller de quelques mois à plusieurs années pour la fraction labile et jusqu'à des dizaines, voire des milliers d'années pour la fraction stable. En conditions normales d'aération, la majorité du carbone apporté au sol est labile (environ 75 % des apports annuels). La quantification de la cinétique de décomposition des matières organiques représente aujourd'hui un sujet de recherche important, car sa connaissance permet de mieux prévoir le devenir des matières organiques dans les sols. La nature biochimique des matières organiques n'est pas le seul facteur définissant le renouvellement de ces dernières, des paramètres complémentaires tels que le climat, la nature du sol et sa gestion influencent également la dynamique des matières organiques dans les sols.

Les conditions climatiques, en particulier la température et la pluviométrie, jouent un rôle prépondérant sur le renouvellement des matières organiques des sols. Ainsi, sous des conditions comparables d'humidité et de végétation, une augmentation de température de 10°C diminue les temps de résidence d'un facteur deux à trois. L'humidité du sol favorise également la biodégradation des matières organiques. Toutefois, en condition d'anaérobiose (sols saturés en eau), les matières organiques s'accumulent du fait du blocage de la biodégradation en l'absence d'oxygène. Ces deux facteurs expliquent en partie le gradient de teneur en carbone observé entre les pays du nord de l'Europe (climat froid et humide), où l'on trouve une grande proportion de sols dont la teneur en carbone est supérieure à 6 %, et les pays du pourtour méditerranéen, où une majorité de sols sont pauvres en carbone.

Les propriétés physico-chimiques des sols telles que la texture et la minéralogie influencent également la dynamique des matières organiques. Ainsi, la porosité importante dans les sols sableux favorise l'aération et le drainage du sol et conduit à une biodégradation plus importante des matières organiques dans ces sols que dans ceux à texture plus fine. À l'inverse, la présence d'argiles dans les sols conduit à un ralentissement de la biodégradation par un processus de protection physique des matières organiques. En effet, les débris végétaux décomposés vont s'associer avec les argiles pour former des agrégats stables. Les matières organiques ainsi piégées sont alors peu accessibles à la dégradation par les micro-organismes. Par ailleurs, les sols à pH acide, en particulier alumineux, sont caractérisés par un ralentissement de la biodégradation des matières organiques, du fait de la faible activité biologique dans ces sols. Ceci conduit à une accumulation de matières organiques faiblement décomposées en surface (litière).

Le mode d'occupation des sols, le mode de gestion et les pratiques culturales constituent d'autres paramètres explicatifs de l'évolution des matières organiques des sols.

La conversion des sols de forêt ou de prairie en sols de culture conduit à une diminution rapide de leurs stocks de carbone. La « déprotection » des matières organiques est le mécanisme majeur invoqué pour expliquer l'impact du travail du sol sur le stockage des matières organiques. La destruction périodique des agrégats par le travail du sol expose les matières organiques, initialement protégées à l'intérieur des agrégats, à l'action des micro-organismes. Cependant, même si le travail du sol peut avoir un effet direct sur la rupture des agrégats du sol, c'est principalement le fait de laisser le sol nu en hiver, qui semble avoir le plus d'impact sur la protection physique des matières organiques du sol. De plus, la désagrégation de la partie superficielle du sol peut initier l'apparition des processus d'érosion qui vont accentuer la perte de matières organiques. La diminution des intrants organiques et le recours quasi systématique à une fertilisation minérale contribuent également à diminuer les entrées de matières organiques dans les sols.

D'autres pratiques agricoles contribuent à maintenir ou à augmenter les stocks de matières organiques dans les sols comme¹ les techniques culturales sans labour², l'introduction de prairies dans les rotations ou l'apport de matières organiques exogènes (ex : fumiers, lisiers, composts).

Etat des stocks de carbone en France et en Europe

En France, la cartographie des stocks de carbone réalisée par Arrouays et al. en 2001³, montre l'importance des conditions pédoclimatiques et du mode d'occupation des sols sur les stocks de carbone. Les stocks les plus faibles (< 50 t ha⁻¹) sont observés dans les régions viticoles sous climat chaud (Languedoc-Roussillon, Toulousain) et dans les régions de grandes cultures intensives (Picardie, Beauce, bassin parisien, bassin aquitain). Les stocks les plus élevés (> 70 t ha⁻¹) se trouvent en zones montagneuses ou marécageuses par effet, respectivement des basses températures et des conditions anaérobies sur la minéralisation du carbone. Les sols de forêt ou de prairies (Est de la France, Bretagne, Massif central, Normandie) présentent des stocks intermédiaires.

Dans sa stratégie thématique en faveur de la protection des sols de 2006, la Commission européenne a identifié la diminution des teneurs en matières organiques des sols comme étant une menace majeure pour leur qualité. En effet, en Europe, 45 % des sols ont une teneur en carbone organique faible (1-2 %) à très faible (< 1 %). La situation est particulièrement préoccupante dans les pays du pourtour méditerranéen où 74 % des sols ont une teneur en carbone organique inférieure à 2 %.

MATIERES ORGANIQUES ET FONCTIONNEMENT DES SOLS

Dans les sols, les matières organiques assurent de multiples fonctions clés :

¹ Expertise INRA :

http://www.inra.fr/1_institut/expertise/expertises_realisees/stocker_du_carbone_dans_les_sols_agricoles_de_france

² <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51256&p1=00&p2=10&ref=17597>

³ Arrouays D., Deslais W., Bateau V. (2001) The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France, *Soil Use and Management*, 17(1), 7-11.

- elles assurent le stockage et la mise à disposition pour la plante, par minéralisation, des éléments nutritifs dont elle a besoin ;
- elles stimulent l'activité biologique, étant à la fois source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol ;
- elles ont un rôle central dans la structuration du sol et participent à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (pluie, tassement...). Elles contribuent à la perméabilité, l'aération du sol et la capacité de rétention en eau ;
- elles jouent un rôle fondamental pour les autres compartiments de l'environnement en participant au maintien de la qualité de l'eau par leur forte capacité de rétention des polluants organiques (pesticides, hydrocarbures...) et minéraux (éléments traces métalliques). Mais elles peuvent aussi être des sources de polluants potentiels, comme les nitrates et les phosphates via notamment l'introduction de matières organiques exogènes.
- elles influencent également la qualité de l'air par le stockage ou l'émission de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, l'effet des matières organiques sur les fonctions des sols dépend aussi de leur nature biochimique. Par exemple, les polysaccharides, la biomasse microbienne, les substances humiques ont été identifiés comme étant les principales fractions organiques actives dans la stabilité structurale des sols. Ainsi, pour établir des relations entre les fonctions du sol et les matières organiques, il est nécessaire de prendre en compte aussi bien la qualité des matières organiques que leur quantité.

Du fait du rôle transversal des matières organiques, la baisse des teneurs dans les sols peut avoir des conséquences agro-environnementales multiples : un risque accru d'érosion, une plus grande sensibilité au tassement, une diminution de la fertilité et de la biodiversité des sols...

Si des relations quantitatives ont été observées entre d'une part la quantité et la nature des matières organiques du sol et d'autre part de nombreuses propriétés et fonctions du sol, celles-ci sont complexes, rarement linéaires et pour l'instant peu élucidées. La question se pose alors, dans un contexte de développement d'une politique de protection des sols, de la définition d'une valeur seuil au dessus de laquelle on considère qu'il n'y a pas d'impact négatif sur les fonctions du sol. S'il ne semble pas exister de valeur unique, des valeurs pourraient être proposées en fonction d'un contexte pédo-climatique donné.

SOL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Pratiques de gestion pour augmenter les stocks de carbone

Certains modes de gestion des terres et pratiques culturales sont susceptibles de favoriser une stabilisation voire une restauration du stock de matières organiques dans les sols. En outre, le Protocole de Kyoto autorise les pays signataires, qui sont soumis à un quota d'émissions, à décompter de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) la séquestration induite par des activités favorisant le piégeage de carbone dans la biomasse et les sols. Ces activités concernent d'une part les opérations de reboisement et d'autre part la gestion des terres cultivées, la lutte contre l'érosion, la gestion des jachères et des prairies.

Influence de la gestion des sols sur les émissions de gaz à effets de serre

L'agriculture est responsable en France de 56 % des émissions totales de N₂O, 33 % des émissions totales de CH₄ et 11 % des émissions totales de CO₂.

Le N₂O est un gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement global est environ 300 fois supérieur à celui du CO₂. Les estimations actuelles indiquent que près de 65 % des émissions de N₂O sont issues du sol dont un tiers proviendrait des sols cultivés. L'augmentation de la teneur de l'atmosphère en N₂O serait liée à l'intensification de l'agriculture et l'utilisation de fertilisants azotés. La production de N₂O par les sols nécessite généralement l'intervention des micro-organismes. Elle est observée principalement au cours de deux étapes du cycle de l'azote, la dénitrification et la nitrification. Le fonctionnement de ces processus microbiens est fortement lié aux conditions d'aération des sols mais également aux conditions climatiques telles que la température qui influence l'activité des micro-organismes et intervient sur la dissolution des gaz dans la solution du sol. Les conditions d'humidité et d'aération jouent donc un rôle prépondérant sur l'importance des émissions de CH₄ et N₂O. Par ailleurs, l'intensité des émissions de CH₄ et N₂O dépend du mode d'occupation des sols et des pratiques culturales.

LES BESOINS DE RECHERCHE

Dans ce contexte, la gestion et la préservation des stocks de matières organiques dans les sols constituent aujourd'hui un enjeu essentiel pour la protection des sols et la réduction des émissions de GES. Toutefois, malgré de nombreuses recherches, qui ont contribué à avoir une meilleure connaissance sur le rôle des matières organiques dans les sols, sur leur dynamique et les facteurs qui influencent le stockage de carbone dans les sols, ou l'émission de GES, il reste encore à élucider un certain nombre de questions :

- Quels sont les déterminants de la variabilité spatiale et temporelle des stocks de carbone dans les sols ? Est-il possible de mettre en place une stratégie d'échantillonnage permettant de s'affranchir de cette variabilité spatio-temporelle ?
- Existe-t-il des relations quantitatives entre la quantité et/ou la qualité des matières organiques du sol et les fonctions des sols ?
- Existe-t-il des indicateurs permettant de rendre compte des variations de stocks de matières organiques ?
- Quelles sont les capacités de stockage en carbone des pratiques alternatives au labour conventionnel ?
- Quels sont les impacts à long terme des pratiques stockant le carbone sur la nature des matières organiques dans les sols ?
- Quels sont les impacts du mode de gestion des sols sur la dynamique de l'azote et les émissions de N₂O ?
- Quelle est la biodégradabilité et la biodisponibilité des matières organiques intervenant comme source de carbone et d'énergie pour les organismes du sol et en particulier les micro-organismes ?

Le programme GESSOL a soutenu plusieurs projets de recherche qui avaient pour objectif de répondre à ces questions.

**RECYCLAGE AGRICOLE DES DECHETS
ORGANIQUES DANS LES SOLS TROPICAUX (ILE DE
LA REUNION) : QUEL IMPACT SUR LES
TRANSFERTS D'ELEMENTS TRACES
METALLIQUES ?**

Nom du responsable scientifique du projet

Emmanuel Doelsch

Noms des autres partenaires scientifiques bénéficiaires

Isabelle Basile-Doelsch
Jean-Yves Bottero
Patrick Cazevaille
Claire Chevassus-Rosset
Frédéric Feder
Jean-Marie Garnier
Jean-Paul Gaudet
Samuel Legros
Clément Levard
Armand Masion
Géraud Moussard
Stéphane Moustier
Jérôme Rose
Hervé Saint-Macary

CONTEXTE GENERAL

Les questions scientifiques abordées dans le cadre de ce projet sont issues de plusieurs spécificités de l'île de La Réunion. La forte croissance démographique de l'île 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, constitué en majeure partie par des effluents d'élevage (633 000 tonnes avec un accroissement de 30% envisagé pour les 10 prochaines années). Les possibilités de valorisation de ces produits sont limitées par un ensemble de contraintes, liées en particulier aux fortes contraintes topographiques et au mitage important et croissant du territoire. Les composts, ne correspondant qu'à une faible proportion du gisement des matières organiques épandables à La Réunion (environ 2600 tonnes), sont néanmoins une filière en plein essor.

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. 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.

Parmi les modes de gestion des déchets, le **recyclage agricole** permet la valorisation de déchets organiques d'origines variées (agricole, urbaine et agro-industrielle). A priori, les concentrations élevées en ETM dans les sols de La Réunion ne favorisent pas la généralisation du recyclage agricole des déchets organiques, 80% des sols étudiés présentant des teneurs en Ni supérieures à la valeur seuil fixée par l'arrêté du 8 janvier 1998, limitant ainsi fortement le développement de l'utilisation des boues de STEP en agriculture. Toutefois, il n'existe aucune prescription législative limitant l'utilisation des autres déchets organiques en agriculture en fonction des concentrations en ETM des sols. Ces pratiques agricoles modifient de manière importante l'état d'équilibre géochimique et biologique du milieu. L'ensemble de ces évolutions est susceptible de modifier la spéciation des ETM. Ces pratiques supposent alors une bonne appréciation des impacts environnementaux, afin de préserver les ressources sols et eaux, fortement sollicitées dans un contexte insulaire où la surface cultivable est limitée. Il est donc fondamental d'évaluer les risques de transferts de ces éléments entre les différents compartiments environnementaux.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Actuellement, peu de moyens sont consacrés à l'évaluation et à la gestion des risques liés au recyclage agricole des déchets organiques en milieu tropical. La pérennisation de telles pratiques agricoles est fortement liée à la préservation des ressources naturelles. Il est alors nécessaire de déterminer et de quantifier les effets des processus liés aux épandages agricoles. Dans le cadre de ce projet, l'impact de l'épandage de déchets organiques sur la spéciation et le transfert des ETM présents dans les sols réunionnais est étudié. Il s'agit de : (i) déterminer la spéciation des ETM des sols de La Réunion et son évolution suite à l'apport de déchets organiques puis (ii) de quantifier la mobilité des ETM entre les différents compartiments : sol, plante, eau et sous-sol, et enfin (iii) de conceptualiser et modéliser les transferts des ETM afin de disposer d'outils de description et de prédiction. Les mécanismes bio-physico-chimiques

sont étudiés à différentes échelles spatio-temporelles : du colloïde à la parcelle de terrain, et de la minute à l'année. A l'échelle intermédiaire (colonne de sol au laboratoire, dm³) et en conditions dynamiques (écoulement d'eau), les mécanismes sont identifiés et hiérarchisés par comparaison entre résultats expérimentaux et modélisation.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

Les mécanismes étudiés sont d'ordre géochimique (adsorption, absorption et complexation avec des ligands organiques), biologique (évolution des produits dégradables, activité d'une plante) et physique (transferts). Les interactions entre les nombreuses composantes de ces mécanismes sont complexes et il est indispensable de les intégrer dans un modèle ; celui-ci peut alors jouer le rôle d'outil de compréhension des mécanismes étudiés d'une part et d'outil de prédiction d'impacts sur les sols, les nappes et les plantes d'autre part. Le modèle PHREEQC (U.S. Geological Survey) possède une grande flexibilité et intègre parfaitement l'évolution des conditions physico chimique et de la composition chimique en reconsidérant les équilibres thermodynamiques. Toutefois, ce modèle, purement mécaniste, ne prend pas en compte directement certains paramètres (comme la dégradation des matières organiques exogènes).

Afin de pouvoir renseigner, évaluer et caler cet outil descriptif de la réactivité et des transferts des ETM dans les sols et les eaux, le projet est structuré en trois volets complémentaires :

- un volet géochimie-réacteur statique qui définit les propriétés et les caractéristiques des matières organiques vis à vis des ETM (nature, propriétés des complexes organo-minéraux, etc.) ;
- un volet transfert-colonne de sol qui définit et prend en compte les paramètres hydrodynamiques des sols et suit, au cours du temps, les couplages dynamiques entre la réactivité bio-géochimique des éléments, les cinétiques physiques et les transferts ;
- un volet étude *in situ*-évaluation du modèle qui consiste en une confrontation des résultats de modélisation avec les mesures de terrain, afin de tenter une évaluation de la robustesse du modèle en conditions *in situ* (hétérogénéités spatiale et temporelle, incertitude et faible nombre de données).

RESULTATS OBTENUS

Pour chacun des volets expérimentaux de ce projet, plusieurs couples sol/déchet organique sont étudiés. Trois sols, naturellement riches en ETM, ont été sélectionnés afin de représenter la diversité des conditions pédologiques rencontrées à l'échelle de l'île de la Réunion (un cambisol andique, un andosol silique et un ferralsol), ainsi que deux déchets organiques (compost de déchets verts et lisier de porc) avec des propriétés contrastées. Les ETM étudiés dans le cadre de ce projet sont : Cr, Cu, Ni, Pb et Zn en raison de leurs fortes occurrences dans les sols et les déchets organiques de la Réunion.

- Volet géochimie-réacteur statique

L'ensemble des résultats qui concernent la spéciation des ETM dans les sols sont cohérents entre eux quelle que soit la méthode utilisée (extraction chimique séquentielle ou techniques spectroscopiques). En effet, ils permettent de montrer que malgré les concentrations élevées en ETM des sols réunionnais, les ETM ne sont pas ou peu mobiles et biodisponibles. Par ailleurs, l'incorporation de déchets de type compost ou lisier de porc ne se traduit pas par une augmentation de la fraction échangeable des ETM.

- **Volet transfert-colonne de sol**

Un bilan de masse réalisé au terme de l'expérimentation en colonnes montre que 100% de Cu et Zn apportés par le lisier sont immobilisés dans les dix premiers centimètres de sol. Autrement dit, ils ne sont pas entraînés dans les horizons inférieurs malgré l'important lessivage auquel ont été soumises les colonnes de sol (équivalent de 2 saisons de pluie).

- **Volet Etude *in situ***

Comme pour l'expérimentation en colonne de sol, les expérimentations *in situ* indiquent que l'épandage de lisier de porc se traduit par une accumulation de Cu et Zn dans les premiers centimètres du sol.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- **Implications pratiques :**

Malgré les concentrations élevées en ETM des sols de La Réunion, l'étude de leur spéciation (forme chimique sous laquelle ils sont présents et qui conditionne leur réactivité) montre qu'ils sont surtout présents sous des formes peu mobiles et peu biodisponibles.

De plus ces éléments ne sont pas mobilisés lors de l'application d'un déchet organique de type lisier de porc ou compost de déchets verts. Les résultats de ce projet Gessol sont tout à fait concordants avec une étude réalisée sur les sols de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST), en perspective d'une demande de dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration.

Comme de nombreux sols agricoles, développés sur des matériaux volcaniques du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise, ces sols présentent des teneurs en Ni, Cr et Cu supérieures aux valeurs seuils réglementaires. L'épandage des boues ne peut donc être autorisé sur ces sols sans un contrôle préalable de la mobilité et de la phytodisponibilité des ETM. Les résultats de ce projet montrent que la mobilité et la phytodisponibilité des éléments Cr, Ni et Cu sont faibles et qu'une demande de dérogation est donc envisageable.

Autrement dit, les concentrations élevées et naturelles en ETM des sols de la Réunion, ne doivent pas constituer un frein à la mise en place du recyclage agricole des déchets organiques.

- **Recommandations et limites éventuelles :**

Par contre, les expériences de laboratoire et *in situ* montrent que les ETM apportés avec le ou les déchets organiques (ici, le lisier de porc) s'accumulent dans les premiers centimètres de sol même si à court terme (c'est-à-dire sur 2 saisons des pluies), aucune mobilité de ces éléments n'a été mesurée. Autrement dit, l'épandage de déchet organique riche en ETM se traduit par une augmentation significative des concentrations en ETM dans les premiers centimètres de sol ce qui pourrait à plus long terme affecter la production agricole en raison de problèmes liés à la phytotoxicité des ETM. Afin d'éviter ces éventuel problèmes, une réglementation sur l'épandage des lisiers de porcs (qui pourrait être proche de celle qui régit l'épandage des boues d'épuration) semble être utile.

- **Réalisations pratiques et valorisation :**

Un site Internet du projet a été créé : <http://etmreunion.cirad.fr/> sur lequel de nombreuses informations (rapports, transparents, photographies) sont disponibles.

Pour assurer un meilleur transfert des résultats au niveau local, un comité de pilotage associant les services de l'état (DDAF et DIREN) et des représentants du monde agricole (MVAD) a été mis en place.

PUBLICATIONS / PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Thèses

Thèse de Clément Levard, soutenance prévue le 2 décembre 2008

Nanoparticules naturelles : imogolites et allophanes. Structure, mécanismes de croissance et capacité de rétention des éléments traces métalliques

Thèse de Samuel Legros, soutenance prévue le 9 décembre 2008

Evaluation multi-échelle de l'impact environnemental de l'épandage de lisier de porc sur un sol tropical (Ile de La Réunion)
Spéciation et modélisation du comportement du cuivre et du zinc.

Publications scientifiques parues, à paraître ou prévues

Doelsch, E. et al., 2006. New Combination of EXAFS Spectroscopy and Density Fractionation for the Speciation of Chromium within an Andosol. *Environmental Science & Technology*, 40(24): 7602-7608.

Doelsch, E., Moussard, G. and Saint Macary, H., 2008. Fractionation of tropical soilborne heavy metals--Comparison of two sequential extraction procedures. *Geoderma*, 143(1-2): 168-179.

Levard, C. et al., 2008. Synthesis of Large Quantities of Single-Walled Aluminogermanate Nanotube. *Journal of American Chemical Society*, 130(18): 5862-5863.

Cu and Zn speciation in pig slurry impact on their mobility in soil.

Legros S., Doelsch E., Rose J., Masion A., Proux O., Hazmann J.L., Saint-Macary H., Bottero J.-Y., 2008. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.72, n.12, p. A531.

Nanosized aluminosilicates (allophane): Formation mechanisms and sorption capacities.

Masion A., Levard C., Ziarelli F., Doelsch E., Rose J., Bottero J.-Y., 2008. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.72, n.12, p. A601.

Role of natural nanoparticles (imogolite and allophane) on the mobility of trace metals in soils from La Reunion island.

Levard C., Rose J., Masion A., Doelsch E., Basile-Doelsch I., Bottero J.Y., 2007. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.71, n.15, p. A564.

Probing the Zn speciation in pig slurry via a combination of sequential extraction, size fractionation and X-Ray absorption Spectroscopy

S. Legros^{1*}, E. Doelsch¹, A. Masion², J. Rose², O. Proux³, J-L. Hazemann⁴, H. Saint-Macary⁵ and J-Y. Bottero²

Probing the Cu speciation in pig slurry via a combination of sequential extraction, size fractionation and X-Ray absorption Spectroscopy

S. Legros^{1*}, E. Doelsch¹, A. Masion², J. Rose², O. Proux³, J-L. Hazemann⁴, H. Saint-Macary⁵ and J-Y. Bottero²

Growth mechanisms of self-assembly aluminogermanate nanotubes of highly monodisperse diameter size.

Clément Levard^{†*Δ}, Jérôme Rose^{†Δ}, Armand Masion^{†Δ}, Emmanuel Doelsch[‡], Antoine Thill, Perrine Maillat, Olivier Spalla, Fabio Ziarelli, Luca Olivi[#], Andrea Cognigni[#], Olivier Grauby^{††}, Jean-Yves Bottero^{†Δ}.

Ni speciation within an andosol: an original lab approach

Clément Levard^{†*Δ}, Emmanuel Doelsch[‡], Jérôme Rose^{†Δ}, Armand Masion^{†Δ}, Isabelle Basile-Doelsch^{†Δ}, Olivier Proux, Jean-Louis Hazemann, Daniel Borschneck^{†Δ}, Jean-Yves Bottero^{†Δ}.

Short-term effect of organic wastes incubation on heavy metal behavior in tropical soils

Emmanuel Doelsch, Armand Masion, Olivia Wojciechowicz, Géraud Moussard and Claire Chevassus-Rosset

MOTS CLES

Éléments traces métalliques, sol, déchet organique, recyclage agricole

PRATIQUES PASTORALES ET QUALITÉ MICROBIOLOGIQUE DES EAUX : RÔLE DES FACTEURS ÉDAPHIQUES ET HYDROMÉTÉOROLOGIQUES DANS LA SURVIE ET LE TRANSFERT À L'ÉCHELLE BASSIN VERSANT, DE POPULATIONS DE BACTÉRIES FÉCALES BOVINES.

Equipe de recherche

J.M. Dorioz (responsable scientifique)

D. Trevisand (IR INRA, responsable de la partie bassin versant)

Ph. Quetin (IE INRA)

M.H. Gourdon (CDD)

J. Lazzarotto (1) (AI) (Laboratoire de chimie des eaux)

INRA - Station d'Hydrobiologie Lacustre B. P. 511 - Equipe Bassin versant
74203 Thonon-les-Bains cedex

Université de Savoie - CISM

Laboratoire des sols 73376 Le Bourget du Lac Cedex

J. Poulenard, *P. Faivre*

UMR Sol-Agronomie-Spatialisation

INRA Rennes

65 rue de Saint-Brieuc CS 84215 35042 Rennes Cedex (France)

Ph. Merot

UMR CNRS 5557, Ecologie microbienne Lyon

Université Claude Bernard - CNRS

Ecologie Microbienne, Lyon 1.

Campus de la Doua, bâtiment Gregor Mendel, 16 rue Dubois 69622 Villeurbanne Cedex

C. Prigent Combaret, *L. Jocteur Monrozier*, *Y. Moënne Locoz*, *M.A. Poirier*

Ecole vétérinaire de Lyon

1, Avenue Bourgelat- BP 83, 69280 Marcy L'Etoile.

Pr. C. Vernozy-Rozand

Doctorants

S. Texier (Université de Savoie-INRA), co-direction Prigent-Combaret – Trévisan. (Prof P. Faivre)

B. Fremaux (Ecole Vétérinaire de Lyon, Université Lyon 1). Participation au projet PASTOR sur le suivi des populations d'*E. coli* pathogènes.(Prof C Vernozy-Rozand)

CONTEXTE GENERAL

La demande sociétale concernant la qualité microbiologique des eaux est récurrente notamment et paradoxalement dans les Alpes du Nord, région considérée comme un « château d'eau » et portant une forte image d'eau pure. En fait, le milieu montagnard est propice au développement de contaminations microbiennes qui perturbent les fonctions de ses aquifères comme ressource en eaux potables (question rendue cruciale localement par le développement du tourisme), en eaux à usages agro-alimentaires (risque pour les fabrications fermières) ou comme support d'activités récréatives (sports d'eaux vives). Les pollutions sont en partie dépendantes des pratiques pastorales. Un point préoccupant est la présence chez les bovins (porteurs sains) de souches d'*E. coli* potentiellement pathogènes pour l'homme et dont la dissémination liée au parcours des troupeaux est envisagée. La maîtrise de la qualité des eaux en zone de pâturages est aussi posée de façon plus générale dans le cadre de la réflexion en cours sur les systèmes d'exploitation durable des ressources fourragères prairiales.

Le projet « Pastor » traite de **la survie** et de **la dynamique du transfert de contaminants microbiens des sols aux eaux de surface**. L'objet d'étude spécifique est la contamination microbiologique des eaux par le pâturage, en zone de montagne (alpage). Le modèle biologique retenu est *E. coli*, indicateur classique de contamination fécale de l'eau.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Les recherches réalisées dans le projet « Pastor » portent sur :

- 1) la dynamique et l'évolution des structures génétiques des populations de *E. coli*, y compris les souches pathogènes STEC⁴, lorsque celles-ci sont soumises aux conditions et contraintes de l'environnement montagnard. Il s'agit notamment d'une part de caractériser les lieux des stockages consécutifs à l'apport de déjections par les bovins, les survies et les évolutions éventuelles de *E. coli* et d'autre part, de comparer leur dynamique avec celle de bactéries telluriques types (les *Pseudomonas* fluorescents) afin de mieux typer les stratégies adaptatives de *E. coli*;
- 2) la nature et le fonctionnement des zones contributives aux contaminations fécales des eaux de surface du bassin versant pâturé. Pour cela, l'intensité des transferts vers les eaux est déterminée à partir des divers types de stocks pour établir un lien entre variabilité des teneurs et flux de contaminants à l'exutoire, fonctionnement pastoral et états hydrologiques du bassin.

RESULTATS OBTENUS

Dynamique et évolution des structures génétiques des populations de *E. coli*

Les résultats obtenus mettent en évidence des fonctionnements inattendus. En premier lieu, il existe un stockage à long terme d'*E. coli* dans les premiers centimètres organiques de la surface des divers sols sous pâturage, avec des effectifs constants quels que soient la saison, la proximité d'une bouse, l'intensité du pâturage ou le contexte bioclimatique. Cette dynamique correspond à celle d'une population naturalisée ; elle est expliquée par référence au concept de capacité d'accueil. La bactérie tellurique type présente une dynamique totalement différente marquée par une forte variabilité représentative de stratégies opportunistes.

⁴ *Escherichia coli* producteurs de Shiga-toxines

Plus en profondeur, la présence durable de populations naturalisées ne s'observe que dans les situations de sols particuliers, peu drainants (confinés) et riches en matière organique. Dans le cas des sols drainants, les effectifs bactériens sont fugaces ; ils semblent résulter de transferts advectifs et dispersifs ; les temps de résidence sont faibles ; les populations répondent à des contrôles biotiques et abiotiques.

Les déjections constituent d'autres lieux de stockage. Elles sont susceptibles d'inclure des mutants pathogènes porteurs de facteurs de toxicité (*E. coli* 0157:H7 v). La survie des *E. coli* y est limitée surtout par la dispersion physique et biologique des bouses ; elle dépend de ce fait de l'intensité de la dessiccation et se maintient sous la couverture neigeuse.

Les variations de la structure génétique des populations d'*E. coli* dans les différents stocks du bassin versant résultent de dynamiques adaptatives. Les populations naturalisées de la rhizosphère de surface ou des milieux confinés s'avèrent spécifiques et très différentes de celles des dépôts fécaux. Ces dernières présentent, à l'inverse des précédentes, un fort degré de similarité avec les populations isolées du rectum des bovins ou retrouvées en profondeur dans les sols drainants. Les stocks diffèrent aussi en terme de propriétés et notamment de susceptibilité vis-à-vis de l'extraction par les écoulements, ruissellement ou infiltration. Les déjections récentes sont les stocks les plus extractibles. La dessiccation des bouses se traduit pas une baisse de ce potentiel de contamination des eaux, alors que la teneur en *E. coli* reste équivalente. Les stocks d'*E. coli* naturalisées des sols, bien qu'assez élevés, sont eux aussi peu mobilisables par le ruissellement. Ces propriétés sont discutées en terme d'état physique des matériaux et de relations bactéries/supports.

La spécialisation et la naturalisation des populations dans le sol requièrent probablement

- 1) une inoculation continue de cellules bactériennes,
- 2) la présence de microsites refuges qui protègent ces dernières de la pression prédatrice,
- 3) l'apport régulier et continu de substrats organiques, proches des composés fécaux de l'environnement primaire du tube digestif et
- 4) un laps de temps suffisant pour que les populations ainsi protégées et alimentées puissent acquérir ou exprimer un métabolisme adaptatif.

Ces conditions sont facilement réunies dans le cas de prairies pâturées où la bouse est un facteur de co-introduction chronique de bactéries et de substrats protecteurs. Ceci distingue les apports par le pâturage et des apports par épandage de lisier ou fumier.

Nature et fonctionnement des zones contributives aux contaminations fécales

Le projet « Pastor » comprend aussi une analyse du fonctionnement du bassin versant pâturé comme système de transfert des contaminants fécaux et une modélisation de ces flux bactériens. Les connaissances acquises concernent les régimes d'exportation à l'exutoire, les facteurs de transfert et les zones contributives. Elles servent de base pour discuter les actions possibles en vue d'une protection des ressources en eau, en zone pâturée.

Le travail de modélisation réalisé prend en compte :

- 1) la forte hétérogénéité qui marque les systèmes pâturés extensifs en ce qui concerne la répartition dans l'espace et dans le temps des déjections animales et des potentiels de contamination associés
- 2) les flux d'eau ; sous prairie, du fait d'une forte perméabilité des horizons de surface des sols, le ruissellement superficiel est généré par la saturation des sols de bas fond,

- 3) le devenir des bactéries fécales durant leur transport entre bouses et réseau hydrographique, avec la définition de fonctions relatives (i) aux stocks de bactéries mobilisables en relation avec le vieillissement et le remaniement des dépôts fécaux, (ii) à leur mise en suspension dans les lames d'eau en mouvement et (iii) à leur rétention / mortalité durant leur trajet jusqu'aux milieux aquatiques récepteurs.

Toutes ces fonctions sont paramétrables et évaluées dans les conditions testées à partir d'un jeu d'observations relatif :

- (i) à la distribution des bouses dans l'espace selon le faciès de végétation,
- (ii) à l'évaluation, sous pluies simulées, des stocks de bactéries potentiellement mobilisables pour les états typiques d'évolution des dépôts fécaux;
- (iii) à l'humidité des sols et au débit du bassin et à leurs modélisations par l'hydrologie des sources variables,
- (iv) à la mesure des flux bactériens à l'exutoire du bassin versant pour différentes conditions d'état du bassin versant (troupeaux et hydrométéorologie).

Le traitement des données montre que le milieu étudié présente un très fort potentiel tampon vis-à-vis des pollutions microbiologiques de l'eau puisque c'est une part infime et momentanée, de quelques ‰ à quelques % du stock total de bactéries fécales des bouses, qui est transférée à l'exutoire. Les écoulements de surface lors des crues estivales représentent le mécanisme dominant de contamination des eaux à l'exutoire. La présence de bouses fraîches est déterminante, ce qui explique les évolutions rapides des niveaux de contamination des eaux de surface, avec l'arrivée ou le départ des troupeaux. En périodes d'étiage et de fonte des neiges, les teneurs restent faibles en tous points du bassin, exutoire compris.

Les secteurs contributifs actifs, critiques en terme de contamination, sont restreints et localisés au niveau des zones de production de ruissellement, c'est-à-dire dans l'environnement immédiat des berges des cours d'eau ou les fonds de talwegs où se concentrent les écoulements latéraux et la pression pastorale. Les sols drainants alimentant des nappes profondes (complexes alluviaux à forte porosité de constitution) sont à l'origine de pics d'exportations post crues, mais de faible ampleur comparativement à ce qui est généré par le ruissellement des versants. Dans le contexte étudié, les apports directs dans le réseau semblent négligeables. La signature génétique des bactéries retrouvées à l'exutoire est en général celle de populations ayant une structure proche de celles des déjections récentes, situation révélatrice de courtes durées de passage dans le bassin versant et ses zones contributives. Le fonctionnement global du système de transfert à l'échelle du bassin versant se traduit donc par une spécialisation des populations d'*E. coli* stockées avec, d'une part des populations naturalisées, peu mobilisables par les flux d'eau, à transfert lent voire nul et d'autre part, une population primaire, non ou peu modifiée par son passage dans l'environnement, caractérisée par des cheminements courts et rapides et finalement impliquée dans la contamination des ressources en eau.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

Les conséquences opérationnelles du projet « Pastor » concernent la prévention des pollutions fécales des eaux de surface et l'utilisation d'*E. coli* comme indicateur. Des approfondissements sur la détection dans les aquifères récepteurs semblent nécessaires pour améliorer les systèmes de surveillance et d'alerte (valeur indicatrice d'*E. coli*, détections des divers types de pics de teneurs non tous liés à des changements de débits). La connaissance

des zones actives fournit des indications sur les bonnes pratiques en matière d'aménagement des circuits de pâturage, d'équipement des points d'abreuvement et des zones de franchissement des cours d'eau, ainsi que sur la mise en place de fils d'éviction localisée des troupeaux. Il s'agit pour l'essentiel de mesures lourdes à mettre en oeuvre qui font ressortir le caractère paradoxal des pollutions microbiologiques diffuses: une proportion très réduite de contaminants transmise aux aquifères, ayant des conséquences très lourdes tant en terme de santé humaine et animale, et dont la maîtrise (partielle) suppose des moyens humains et financiers relativement élevés.

Pour permettre une meilleure appropriation des résultats au niveau local, ceux-ci ont été restitués auprès des acteurs locaux (élus, professionnels agricoles, agriculteurs et Chambre d'agriculture de Haute-Savoie) en 2006 et en 2008 à Vacheresse.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES, A PARAITRE OU PREVUES :

Thèses :

Texier S. Dispersion et survie des populations de bactéries fécales bovines dans le sol des écosystèmes pâturés subalpins : conséquences sur le transfert bactérien dans les bassins versants. Université de Savoie, soutenance : septembre 2008. (Avis favorables des rapporteurs)

Fremaux B., 2007. Écologie des *Escherichia coli* producteurs de Shiga-toxines (STEC) dans les effluents d'élevages bovins et le sol Université Claude Bernard Lyon1 et INSALyon.

Articles :

Frémaux B., Prigent Combaret C., Vernozy Roland C., (sous presse). Long term survival of shiga Toxin-producing *Escherichia coli* in cattle effluents and environment : an updated review. *vet Microbiol.*

S. Texier¹, C. Prigent-Combaret, M.-H. Gourdon, M.-A. Poirier, P. Faivre, J.-M. Dorioz, J. Poulenard, L. Jocteur-Monrozier, Y. Moëgne-Loccoz, D. Trevisan, 2003. Persistence of Culturable *Escherichia coli* Fecal Contaminants in Dairy 1 Alpine Grassland Soils, *J. Environ. Qual.* (sous presse)

Gascuel-Odoux C. et Dorioz J.M., Merot P., Massa F., Grimaldi C., Poulenard J. Rôle des prairies dans les pollutions diffuses. Effet de la localisation et des bordures (haies, dispositifs enherbés, berges) 2008, *Fourrages* n°192 (p 409, 422) cet article utilise en partie les résultats Pastor

D.Trevisan, Ph. Quetin, L. Jocteur Monrozier, J. Poulenard, Ph. Merot, J.M. Dorioz. Analyse inverse des pollutions bacteriennes fecales diffuses et delimitation des zones critiques dans les bassins versants patures extensifs. *Wat. Research.*

B. Fremaux, C. Prigent-Combaret, L. Beutin, A. Gleizal, D. Trevisan, P. Quetin, L. Jocteur-Monrozier, C. Vernozy-Rozand. Survival and spread of Shiga-toxin producing *Escherichia coli* in a high mountain pastured watershed. *Applied and Environ. Microbiol.*

S. Texier, L. Jocteur-Monrozier, M.-A. Poirier, P. Faivre, D. Trevisan, Y. Moëgne-Loccoz, C. Prigent-Combaret. Tracking of naturalized *Escherichia coli* populations and potential sources of water contamination in the different compartments of a French dairy watershed by uidA PCR-DGGE. *Environ. Microbiol.*

MOTS CLES

Bassin versant, *E. coli*, Pastoralisme, Sols, Transfert, Qualité des eaux, Bassin versant

**MODIFICATIONS DES PRATIQUES AGRICOLES ET
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX: VERS UN
MEILLEUR COUPLAGE DE LA DYNAMIQUE DES
COMMUNAUTES MICROBIENNES DU SOL, DES
MATIERES ORGANIQUES DU SOL ET DES FLUX DE
CARBONE ET D'AZOTE DANS LES SOLS
(COSMOSFLUX)**

Responsables scientifiques

Sylvie RECOUS (DR2) et Xavier LE ROUX (DR2)
INRA, UR 1158 Agronomie, Laon-Reims-Mons UMR Ecologie Microbienne, Lyon

Noms des participants au projet

UMR 5557 Ecologie Microbienne CNRS-Lyon I- INRA
X. Le Roux, E. Attard, F. Poly et coll.

UR 1158 INRA Agronomie Laon-Reims-Mons
S. Recous, B. Nicolardot et coll.

UMR 7618 INRA-CNRS-AgroParisTech-ENS-UPMC BioemCO, Thiverval-Grignon
C. Rumpel, MF Dignac

Unité UEPEF-INRA et UR Lusignan
A. Chabbi, G. Lemaire, F. Gastal, et coll.

UR Science du Sol Versailles
M. Balabane

Arvalis-Institut du Végétal
F. Laurent

OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les pratiques agricoles actuelles sont caractérisées par des changements de mode d'occupation et de gestion des sols liés à des décisions socio-économiques pouvant opérer 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 associées 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 enzymatique), et les flux de C et N associés répondent à un changement de pratiques culturales. Ce problème a été abordé lors des perturbations que sont (i) les remises en culture de prairies temporaires et/ou 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-découplages entre les facteurs, les acteurs et les flux résultant, et apprécier *in fine* les réponses des sols et agrosystèmes aux changements de mode d'occupation et de gestion des sols.

SITES RETENUS ET METHODES

Concrètement, deux sites d'étude ont été retenus 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 'Agrosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité', ACBB) 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 permettent 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 utilisées pour la culture.
- Le deuxième site (essais de longue durée de Boigneville, Arvalis Institut du Végétal) correspond à une situation où ont été différenciés pendant 14 ans les modes de travail du sol et de restitution organique, et où on regarde aujourd'hui le résultat de cette différenciation en termes de stocks de carbone et qualité des MOS, état structural, minéralisation de l'azote, et processus microbiens. Deux situations « à l'équilibre » (travail ou non travail depuis 14 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 (*de 0 à 3 mois*) les effets des changements de mode de gestion sur les stocks (C et N organique), et les flux nets d'azote et de carbone dans les sols (minéralisation, stabilisation), vers l'atmosphère (CO₂), et vers l'hydrosphère (nitrates).
- *un suivi dynamique (0, 3 semaines, 3 mois, 6 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans⁵) de l'évolution* (i) des matières organiques, du point de vue quantitatif et qualitatif (C et N total, biomasse microbienne C, C soluble), (ii) de l'état des communautés microbiennes du sol clé impliquées dans les cycles de C et de N : communautés microbiennes hétérotrophes, dénitrifiantes et nitrifiantes en termes d'effectif, structure/diversité et activités potentielles et semi-potentielles. La structure et l'effectif des communautés dénitrifiantes et nitrifiantes a été caractérisée par

⁵ uniquement pour le site de Lusignan.

application d'outils de biologie moléculaire (DGGE et clonage/séquençage ; PCR quantitative) ciblant des gènes de fonctions clés (*nirK* et *nirS* pour les dénitrifiants ; *norA* pour les nitrifiants) et donc les groupes fonctionnels correspondant.

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

RESULTATS

Comparaison cultures/prairie et labour/semis direct

De fortes différences dans les caractéristiques des sols sont toujours observées entre sols sous prairies ou portant une rotation de culture annuelle à Lusignan ; de même, le sol sans labour (depuis 14 ans) et le sol labouré annuellement à Boigneville diffèrent fortement. Les deux systèmes non labourés se caractérisent par un fort gradient vertical de matière organique : *le système prairial* conduit, dans la couche de surface (0-10cm) occupée par le peuplement végétal 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 et les effectifs des communautés microbiennes sont aussi significativement différents. *Le non travail du sol* se distingue du labour par 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'effet mode de gestion n'est pas significatif pour les variables étudiées pour l'horizon sous-jacent (5-20cm). L'essentiel de l'effet de l'abandon du labour est donc lié à un 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.

Effet des perturbations induites par le changement de pratiques

Le retournement de la prairie et le labour des sols en semis direct depuis plusieurs années ont eu en commun d'induire à court terme des flux de minéralisation nette de C et d'azote très importants (respiration du sol, production de nitrates). Dans ces situations les variables concernant les pools organiques et microbiens ainsi que les flux bruts et potentiels ont changé rapidement pour rejoindre le niveau observé dans la situation cultivée d'une part, labourée d'autre part. Cette dynamique est attribuée d'une part à la perturbation physique et à la dilution du sol de cette couche superficielle dans la couche sous-jacente, et d'autre part à l'utilisation de la matière organique dont une fraction est minéralisée. Dans les deux situations inverses, l'abandon du labour à Boigneville, l'installation de la prairie à Lusignan, il a été constaté au contraire que les variables relatives aux compartiments organiques, flux bruts d'azote et activités potentielles n'ont pratiquement pas changé après respectivement 2 et 3 ans. Ceci indique une forte dissymétrie dans les effets des conversions d'un mode de gestion des sols à un autre, avec des conséquences environnementales très différentes (quantité et localisation des compartiments organiques et activités microbiennes des cycles du carbone et de l'azote)

Relations entre structure, effectif, activités des communautés microbiennes et flux d'azote et de carbone

L'étude a évalué ce couplage pour les communautés nitrifiantes et dénitrifiantes. La vitesse avec laquelle la structure des communautés microbiennes a été modifiée dépend de l'intensité des modifications du point de vue des variables environnementales et de la disponibilité en

substrat (ammonium, nitrate, carbone organique). Sur la durée de nos expériences, seule la structure génétique des nitrifiants finit par être déterminée par la nouvelle gestion, peut être en raison de la plus faible diversité génétique de cette communauté. D'une manière générale, la structure génétique d'une communauté explique peu les variations d'activité correspondantes et ceci est vrai pour les deux communautés microbiennes. A l'inverse, pour l'activité nitrifiante, les changements d'effectifs ont expliqué plus de 80% de l'activité, quel que soit le traitement et la date. Ces effectifs ont été eux-mêmes bien corrélés à la minéralisation brute mesurée, c'est-à-dire à la disponibilité du substrat pour les nitrifiants (flux d'ammonium). Pour l'activité dénitrifiante, le facteur explicatif principal est la teneur en C organique des sols, qui a d'une part un effet significatif sur les effectifs des dénitrifiants, et d'autre part sur l'activité spécifique des dénitrifiants.

Nous en concluons que dans le cas d'une activité obligatoire à la croissance et au maintien d'une communauté microbienne, telle que l'oxydation de l'ammonium ou du nitrite par les nitrifiants, la nature du couplage se traduit par une relation forte entre disponibilité du substrat, effectif et activité. Par contre, dans le cas d'une activité facultative pour la communauté microbienne qui la réalise, telle que la dénitrification, une plus grande complexité des déterminants de l'activité et un découplage assez important entre disponibilité en substrat, effectif et activité sont observés.

D'un point de vue pratique, cette étude souligne que (1) les forts flux de N₂O émis par les sols non labourés parfois rapportés dans la littérature peuvent s'expliquer par le fort potentiel de dénitrification observé dans la couche de surface de ces sols, (2) les caractéristiques des sols non labourés, y compris en terme de biodiversité microbienne, mettent plusieurs années à se mettre en place, mais sont immédiatement modifiées par application d'un labour, et (3) la nature du couplage disponibilité en substrat-effectif-activité diffère nettement entre activités obligatoires ou facultatives pour les communautés microbiennes considérées, et le type de modélisation à mettre en œuvre différera donc entre activités obligatoires ou facultatives.

FORMATION PAR LA RECHERCHE

Leonard C. 2005. Analyse de la dynamique de minéralisation de C et N après retournement et mise en culture d'une prairie. Mémoire de Master 2, Biosphère Continentale, INA PG- Paris VI, 35 pages+ annexes.

Shili I. (2006) Effet à court terme du changement de mode de travail du sol sur les flux de carbone et d'azote. Mémoire Master 2 Sciences et Technologies du Vivant, Mention SAGEP, INA PG-INRA, 21 pages + annexes.

Eleonore Attard (2005-2008), Etude de la réponse des communautés microbiennes du sol aux changements des modes de gestion dans les agrosystèmes. Doctorat de l'université de Poitiers, 164 pages.

PUBLICATIONS/PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Articles à comité de lecture

Attard E., Poly F., Laurent F., Commeaux C., Recous S., Le Roux X. Response of nitrite oxidizers to changes in tillage practices and link with nitrite-oxidation activity. Soumis.

Attard E., Laurent F., Chabbi A., Schmid B., Recous S. & Le Roux X. 2008. Soil organic carbon rather than denitrifier abundance and diversity drives potential denitrification after changes in land-use and tillage practices. (sera soumis en décembre)

LA SOURCE RACINAIRE DE CARBONE POUR LA GESTION ET LA MODELISATION DES MATIERES ORGANIQUES DES SOLS (RACINE-C)

Nom du responsable scientifique du projet

Jérôme Balesdent
INRA UR 1119 Géochimie des Sols et des Eaux Europôle de l'Arbois BP 80 13525 Aix en
Provence Cedex 04

Noms des autres partenaires scientifiques bénéficiaires

Laboratoire d'Ecologie Microbienne de la Rhizosphère
UMR 6191 CNRS-CEA-Univ. de la Méditerranée
DSV/IBEB/SBVME Centre de Cadarache 13108 Saint-Paul-lez-Durance Cedex France
J. Balesdent, C. Marol, D. Derrien

Groupe de Recherches et d'Applications en Phytotechnologies
CEA / DSV/IBEB/SBVME . Centre de Cadarache 13108 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex
F. Gibiat, M. Péan.

UMR "Agronomie et Environnement"
INRA/INPL/ENSAIA
BP 172 54505 Vandoeuvre lès Nancy
C. Robin

INRA "Fonctionnement et Gestion de l'Ecosystème Prairial", 234 Avenue du Brézat, 63100
Clermont-Ferrand
S. Fontaine, K. Klumpp, J.F. Soussana, P. Loiseau

CONTEXTE GENERAL

Les matières organiques sont une composante majeure et gérable de la qualité des sols. Certains travaux avancent que le **carbone d'origine racinaire** en est la source principale, mais, paradoxalement les flux ne sont pas clairement quantifiés, et encore moins caractérisés chimiquement, ce qui en fait un verrou pour la modélisation du carbone des sols. Dans une perspective de mutation des pratiques agricoles, il est donc nécessaire de prévoir le budget carboné au sol des différentes pratiques. Il apparaît alors que l'apport souterrain par les racines des plantes et son devenir (i) sont très mal estimés et (ii) sont considérés jusqu'à présent comme non gérables, alors que cette source est peut être majoritaire. Le flux de carbone souterrain est également la partie la moins connue dans la représentation du cycle terrestre du carbone ou des écosystèmes terrestres.

Le flux de carbone libéré dans le sol par les racines vivantes, dénommé **rhizodéposition**, intègre plusieurs composés et voies de libération :

- les exsudats, petites molécules solubles libérées par des processus actifs d'excrétion et des processus passifs;
- les mucilages, protéines et polymères extracellulaires, libérées par des processus actifs d'excrétion ;
- la libération de cellules vivantes et actives (cellules de la coiffe des apex racinaires);
- la libération passive de résidus de parois et de cellules, poils racinaires et cellules corticales.

Il s'agit d'une résultante de la libération de carbone et de la ré-assimilation de molécules organiques solubles par les racines elles-mêmes. Le flux de carbone racinaire a fait l'objet de plusieurs synthèses bibliographiques, dont deux françaises (Nguyen, 2003 ; Rasse et al. 2005). La littérature fait état de nombreuses incertitudes voire divergences sur : l'ordre de grandeur des flux, la nature du carbone rhizodéposé, son devenir à long terme, la préservation sélective par rapport aux matières végétales aériennes, son impact sur le carbone préexistant du sol.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Le projet se place dans l'objectif de la modélisation de la dynamique du carbone des sols et de la gestion des matières organiques. Il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'ordre de grandeur des flux de carbone rhizodéposé ?
- Quel sera le devenir à long terme de ce carbone ?
- Comment représenter ce devenir dans les modèles conventionnels de dynamique du carbone des sols ?
- Quel est l'effet de la rhizodéposition et de la libération de carbone racinaire mort sur la dégradation des matières organiques préexistantes du sol ?

Pour l'ensemble du projet, afin de répondre à ces questions, des expériences de traçage isotopique inédites ont été menées sur quelques agro-écosystèmes sélectionnés comme représentatifs.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

Les composés rhizodéposés sont d'une part transitoires et rapidement biodégradés, et d'autre part difficilement extractibles (voire impossibles à extraire du sol). Leur étude peut être faite en solutions stériles, mais celles-ci ne sont aucunement représentatives de la rhizosphère. Aussi le projet a fait systématiquement appel au traçage isotopique du carbone, soit par

l'isotope stable ^{13}C soit par l'isotope radioactif ^{14}C , dans le cas de marquages simultanés de deux sources de carbone différentes.

Pour ce projet, une méthode spécifique a été développée permettant de mesurer le rapport isotopique non seulement sur le carbone organique total du sol, mais aussi sur des classes moléculaires, ce qui a permis de déterminer la nature des principaux rhizodépôts et de leurs produits.

Les limites du projet concernent la généralisation et l'extrapolation à d'autres systèmes que ceux étudiés, en raison de la très grande variété possible de l'ensemble des géotypes, types de sols et conditions physiques : tous ces facteurs étant susceptibles d'affecter la rhizodéposition.

RESULTATS OBTENUS

Le projet a mis en place de nombreuses expérimentations isotopiques sur des systèmes en blé, colza, maïs, tournesol, ray-grass, fétuque et sur des prairies permanentes. Il a apporté les éléments de réponse suivants aux différentes questions posées par la rhizodéposition :

1. Quel est le flux de carbone libéré dans le sol par les racines ?

- Pour les quatre plantes testées (blé, maïs, tournesol, colza), le flux de rhizodéposition en période de croissance est de l'ordre de 6 à 10% de la production primaire nette, correspondant à 15 à 35% de la production de biomasse racinaire.
- Dans des projets qui viseraient à estimer la production primaire nette souterraine, l'erreur sur la mesure de biomasse racinaire elle-même peut être supérieure à l'erreur liée à la méconnaissance du flux de rhizodéposition.

2. Quelle est la nature du carbone rhizodéposé et que devient-il à moyen ou long terme dans les sols ?

- Les polysaccharides sont les composés dominants du flux de rhizodéposition (étude sur blé). Ces derniers proviennent des mucilages, des parois et des résidus cellulaires. Les molécules solubles comme les sucres simples et les acides organiques sont minoritaires (étude sur blé et colza). Une partie importante du flux de rhizodéposition est rapidement convertie en composés microbiens.
- Contrairement à ce qui est couramment annoncé, les composés très biodégradables ont un rendement en matières organiques à long terme (plusieurs années) plus important que les composés plus lentement dégradables comme les fibres végétales. En particulier, les rhizodépôts ont un rendement en matières organiques supérieur ou égal à celui des restitutions aériennes de la plante.
- Le devenir des litières souterraines prairiales dépend de la stratégie adaptative des espèces, conservatives ou compétitives, *via* leur composition biochimique. Ce devenir dépend aussi de la conduite, en particulier de la coupe ou de la consommation herbivore des parties aériennes.

3. Quel est l'effet indirect de l'apport de carbone par les racines sur la minéralisation du carbone du sol ?

- L'apport de litières racinaires stimule la minéralisation des matières organiques des horizons profonds des sols. La biodégradation des matières organiques anciennes y est en effet limitée par la taille des communautés microbiennes présentes et par le trop faible apport énergétique ambiant. La stimulation est induite par les apports de composés polymériques et non pas par les petites molécules comme les sucres, ce qui

est compatible avec l'activité enzymatique extracellulaire propre à la dégradation des substrats complexes. Ce résultat important et innovant nous amène à revisiter complètement la représentation du rendement en matière organique du carbone ou la linéarité des modèles.

4. Implications pour la modélisation et la prévision

- Dans l'état actuel des modèles opérationnels du carbone des sols (RothC et Century par exemple), une solution simple est d'ajouter la rhizodéposition au flux de production de biomasse souterraine. Le flux proposé est de 0.25 x la croissance racinaire, avec une incertitude de plus ou moins 0.10 x. Cet apport est alloué au compartiment végétal le plus labile (rapidement dégradé mais avec le même rendement en humus que les autres apports). Concernant les différentes litières racinaires, les compartimentations courantes en deux sous-compartiments végétaux tenant compte de la composition biochimique sont convenables.
- La réalité est cependant assez différente. Les apports de carbone ont des effets sur la minéralisation du carbone. Plutôt que d'affiner les paramètres des précédents modèles, il sera nécessaire de développer une modélisation plus prospective, de nouvelle génération, non linéaire, sur la base de stratégies écologiques ou de variations du rendement en composés protégés.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

L'estimation des flux d'apports organiques des cultures au sol est actuellement fondée sur les mesures de biomasse aérienne non récoltée et de biomasse souterraine. La biomasse souterraine est souvent estimée par des relations allométriques : nous montrons qu'il faut y ajouter la rhizodéposition, de l'ordre de 15 à 35% de la biomasse racinaire. De plus, les restitutions souterraines contribuent plus aux matières organiques à long terme que les restitutions aériennes. Ainsi le rapport de la contribution souterraine à la contribution aérienne aux matières organiques est largement supérieur au rapport des biomasses correspondantes. Récolter les systèmes racinaires végétaux aurait pour conséquence un appauvrissement important des sols en matières organiques.

- Réalisations pratiques et valorisation :

Les principales réalisations pratiques prévues sont le paramétrage des modèles courants du carbone organique des sols, pour les flux d'origine souterraine.

Pour une meilleure prévision des flux racinaires, il manque encore une analyse bibliographique internationale des rapports de la production de biomasse racinaire sur la biomasse aérienne, qui sélectionne les études de qualité et prenne en compte les modes opératoires utilisés.

- Recommandations diverses à l'attention des spécialistes pour l'expression et la mesure des flux de carbone souterrains

Nous recommandons que la mesure de biomasse végétale souterraine sèche fasse appel au dosage soit de la teneur en carbone soit de la perte au feu de la matière sèche de racines pesée. En effet, l'expérience montre que les masses de racines récupérées de sols contiennent la plupart du temps une proportion importante (plusieurs dizaines de %) de minéraux du sol, peu perceptibles en raison de leur densité très élevée et coloration faible, ceci même après lavage en laboratoire par des solutions salines. Confondre la contamination minérale avec de la

matière végétale peut amener à surestimer d'autant les biomasses ou productions primaires souterraines.

Les flux de rhizodéposition posent un problème majeur de dimension et d'unités pour l'expression des résultats. Dans la littérature, des dizaines d'expressions existent, de la mole par millimètre de racine au kg/mètre carré/an en passant par les g/plante/jour ou la proportion de la production primaire brute. A l'issue du projet, nous recommandons que le flux de rhizodéposition soit exprimé pour les plantes annuelles comme ratio de la production racinaire nette. D'une part cette dernière valeur peut-être mesurée à partir de l'augmentation de la masse racinaire dans un intervalle de temps. D'autre part, nous avons montré que la production (croissance) racinaire est un meilleur estimateur statistique de la rhizodéposition que la production primaire totale, aérienne plus souterraine.

Dans les expériences de traçage isotopique, la mesure de la quantité de traceur récupérée sous forme organique dans le sol sept jours après marquage fournit un estimateur des flux rhizodéposés plus fiable que les bilans d'échanges gazeux entre sol, plante et atmosphère, et pragmatique pour l'estimation du flux de production de matières organiques du sol.

POUR EN SAVOIR PLUS :

Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 7167, 277-U10.

Nguyen C. 2003. Rhizodeposition of organic C by plant : mechanisms and control. *Agronomie*, 23, 375-396.

Rasse D.P., Rumpel C. & Dignac M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269, 341-356.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES, A PARAITRE OU PREVUES :

Sébastien Fontaine, Sébastien Barot, Pierre Barré, Nadia Bdioui, Bruno Mary & Cornelia Rumpel. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 7167 Pages: 277-U10.

Derrien D., Marol C. & Balesdent J. 2007. Microbial biosyntheses of individual neutral sugars among sets of substrates and soils. *Geoderma* 139, 190-198.

Klumpp, K., Soussana, J.F. & Falcimagne, R. (2007): Long-term steady state ¹³C labelling to investigate soil carbon turnover in grasslands. *Biogosciences*, 4, 1-10.

Derrien D. , C. Marol, M. Balabane & J. Balesdent. 2006. The turnover of carbohydrate carbon in a cultivated soil estimated by ¹³C natural abundances. *Europ. J. Soil Sci.* 57(4) 547-557.

Klumpp, K. & Soussana, J.F. 2007. Plant strategies mediate a trade-off between aboveground productivity and belowground carbon sequestration in grassland mesocosms. *Ecol. Letters.*, submitted 2007

D. Derrien and J. Balesdent. A compound-specific model of soil organic carbon dynamics: application to the carbohydrate component

Balesdent J., Kirman S., Péan M. & Marol C. Dynamics of rhizodeposits of *Brassica napus*, *Triticum aestivum*, *Zea mays*, *Helianthus annuus* in soil: measurements using ¹³C labelling.

Klumpp, K., Soussana, J.F. & Loiseau, P. Direct and indirect effects of plant community structure on carbon sequestration and turn over in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, In preparation.

Personeni, Fontaine, Balesdent, Robin. Impact of artificial root exudates on the mineralization of root litter of *Festuca* and *Ryegrass*.

Mary B., Balesdent J. Contribution des apports racinaires aux matières organiques du sol.. (Article de vulgarisation)

MOTS CLES

Carbone du sol, matières organiques, racines, rhizodéposition, exsudation.

**MISE AU POINT D'OUTILS DE PREVISION DE
L'EVOLUTION DE LA STABILITE DE LA
STRUCTURE DE SOLS SOUS L'EFFET DE LA
GESTION ORGANIQUE DES SOLS
« MOST » (MATIERES ORGANIQUES ET
STRUCTURE DES SOLS)**

Nom du responsable scientifique du projet

Claire Chenu

INRA de Grignon, UMR Bioemco (CNRS-UPMC-INRA-AgroParisTech-ENS-ENSCP)
Bâtiment EGR 78850 Thiverval Grignon

Noms des autres partenaires scientifiques du projet

INRA- AgroParisTech, Grignon

UR Science du Sol INRA, Orléans

UMR SAS INRA ENSAR, Rennes

UMR Agronomie INRA- AgroParisTech, 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 les Déchets), Limay

Chambre d'Agriculture du Loiret, Orléans

UR Ecodiv, Université de Rouen

UMR Microbiologie du Froid CNRS-Université de Rouen

OBJECTIFS

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. 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, des valeurs seuil de teneur en matières organiques des sols, pourraient être définies, de manière objective, par rapport à des valeurs souhaitées de propriétés des sols comme la stabilité structurale.

Le projet a pour objectif général **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 celui des sols limoneux. Le projet a quatre objectifs spécifiques:

- Standardiser et développer les méthodes de mesure de la stabilité structurale.
- Construire des fonctions de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques constitutives du sol.
- Etablir des relations prédictives entre stabilité structurale et fractions organiques du sol
- Construire des outils de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO au sol.

RESULTATS

Le projet a été basé d'une part sur la synthèse de travaux antérieurs des équipes et sur des expérimentations en réseau réalisées par les différentes équipes, soit à partir de situations de terrain, soit au laboratoire.

• Standardiser et développer les méthodes de mesure de la stabilité structurale.

Des opérations d'intercalibration ont été entreprises, accompagnant la normalisation de la méthode de mesure de la stabilité structurale. Un effort particulier a été fait sur l'étape de prélèvement et préparation, aboutissant à un mode opératoire partagé.

• Construire des fonctions de pédotransfert reliant la stabilité structurale aux caractéristiques constitutives du sol.

Une base de données a été constituée qui rassemble les caractéristiques constitutives de sols 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 AGRESTA rassemble aujourd'hui 430 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. Il s'est avéré nécessaire d'introduire une variable descriptive du mode d'occupation des sols. Une fonction de pédotransfert est donc d'ores et déjà disponible.

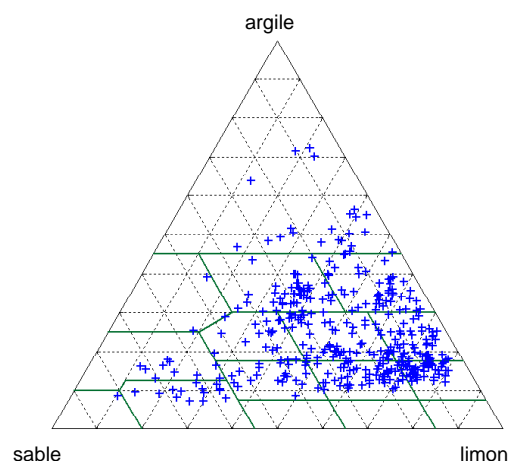


Figure 1. Texture des échantillons présents dans la base Agresta d'après le triangle de texture de Jamagne, 1967

• Etablir des relations prédictives entre stabilité structurale et fractions organiques du sol

Nous avons étudié la relation entre stabilité structurale et quantité et qualité des matières organiques et activité microbienne sur différents essais agronomiques et parcelles cultivées, toutes sur sols limoneux mais dans lesquelles des pratiques culturales (travail du sol, apports de produits résiduels organiques, plante de couverture..) modifiaient le statut organique et biologique des sols.

Les résultats confirment que certains systèmes de culture permettent une amélioration rapide de la stabilité structurale, en relation avec un enrichissement en matière organique dans les horizons superficiels du sol. (Figure 2)

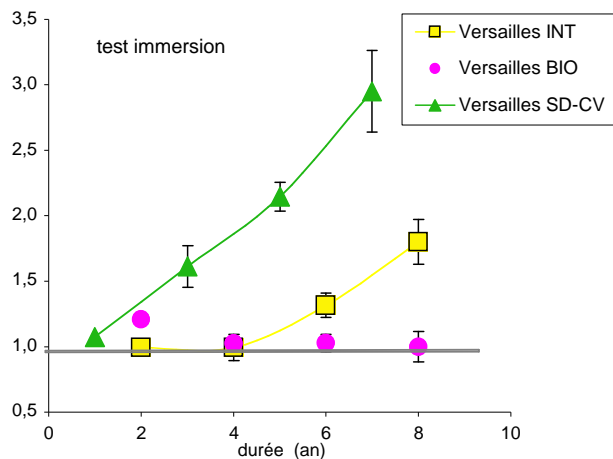


Figure 2. Evolution de la stabilité structurale dans l'essai systèmes de culture de Versailles (La Cage) en référence aux valeurs mesurées sur les parcelles en système conventionnel. Le système semis direct – plante de couverture permet une augmentation très rapide de la stabilité structurale.

Les mesures puis les relations statistiques établies entre un certain nombre de variables biologiques et organiques (C- total, C-biomasse microbienne, abondance des

champignons, C-matières organiques particulières, C- polysaccharides, ...) et la stabilité structurale, montrent des corrélations étroites avec la stabilité structurale, mais pas de hiérarchie claire en termes de prédicteurs de la 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

• Construire des outils de prévision des variations de stabilité structurale suite à un apport de MO au sol.

Il s'agissait là d'analyser l'évolution temporelle de la stabilité de la structure du sol suite à un apport de matières organiques au sol en fonction des caractéristiques de l'apport. La synthèse de travaux antérieurs des équipes, de ceux de la littérature et les expérimentations réalisées au cours du projet ont montré :

- Les relations temporelles qui existent entre quantité et décomposabilité des matières organiques apportées et évolution de la stabilité structurale.
- Les relations temporelles entre abondance et activité microbienne et stabilité structurale.
- Un effet direct des MO apportées sur la structure présent avec des composts mûrs, du à des substances humiques.
- L'effet des développements microbiens sur l'hydrophobie des sols, mais aussi sur leur cohésion.

Deux démarches de modélisation ont été développées dans le projet 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 (Pouloud) 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 (Cantis-Stab).

PERSPECTIVES

Les modèles prédictifs proposés dans le cadre du projet doivent être calibrés, puis validés sur des gammes de situations plus larges que celles qui ont présidé à leur établissement. Ils doivent également être développés afin de prendre en compte l'effet direct de matières organiques apportées. Le projet ouvre également des perspectives de recherche, notamment sur les déterminants nutritionnels (disponibilité N) de l'agrégation biologique et sur les interactions entre conditions climatiques, activité microbienne et agrégation des sols.

TRANSFERTS EFFECTUES OU ENVISAGEABLES AUPRES DES UTILISATEURS DES RECHERCHES

- Guide de prélèvement de sols en vue de mesurer leur stabilité structurale (à formaliser)
- Outil prédictif de la stabilité structurale en fonction de leurs caractéristiques de constitution applicable à la prédiction pour une augmentation donnée de la teneur en C du sol en surface (fonction de pédotransfert). Cet outil pourra permettre de définir des teneurs seuil en C dans une appréciation de la qualité physique des sols et du risque d'érosion. (à formaliser)
- Classification de l'effet de pratiques et systèmes de culture pour ce qui est de leur impact sur la stabilité structurale des sols. (à formaliser)
- Outil prédictif des variations temporelles de la stabilité structurale suite à des apports organiques au sol (à développer).

VALORISATIONS

Mémoires diplômants

- Cosentino, D., 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique, Paris, 214 pp.
- Coucheney, E., 2005. Etude des variations à court terme de la stabilité structurale d'un sol limoneux sous l'effet de facteurs climatiques. Mémoire de master Fonctionnement physique chimique et biologique de la Biosphère continentale. Université de Paris 6 - INAPG, Paris, 35 pp.
- Lebugle, F. 2006 Analyse statistique des variables pédologiques contrôlant la stabilité structurale des sols. Développement d'une méthodologie. Rapport de stage Master 2, Mathématiques et aide à la décision, Université d'Orléans
- Peltre, C., 2006. Caractérisation chimique de la matière organique humifiée de composts d'origine urbaine en relation avec leur rôle dans la stabilisation de la structure des sols limoneux. Mémoire de fin d'études, INH, Angers.
- Som, MP., 2006. Étude moléculaire des composés organiques de compost, formation, transformation dans les sols ; action sur les propriétés des sols. Thèse de l'Université de Poitiers, 241 p.

Articles scientifiques

- Cosentino D., Chenu C., Garnier P.. Short-term aggregate stability dynamics after a carbon input: quantitative relationships and modelling. En révision pour European Journal of Soil Science
- Abiven S., Menasserri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. Soil Biology and Biochemistry, 2009, doi:10.1016/j.soilbio.2008.09.015

MOTS CLES

Sol, stabilité de la structure, matière organique, résidu de culture, produit résiduaire organique, fonction de pédotransfert, modèle prédictif, standardisation de méthodes, essai au champ.

DEGRADATION PHYSIQUE DES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS LIEE AU TASSEMENT (DST) IMPACT, PREVISION, PREVENTION, SUIVI, CARTOGRAPHIE

Nom du responsable scientifique du projet

Guy Richard

INRA Orléans, Unité de Science du Sol, 2163 avenue de la Pomme de Pin, CS 40001
45075 Orléans cedex 2

Noms des participants au projet

Arvalis – Institut du végétal
J. Labreuche, M. Martin

ITB, Paris
E. Leveque, C. Royer

CIVC, Epernay
S. Debuissou

ONF, Paris
A. Brêthes

ENPC CERMES, Marne-La-Vallée
Y.J. Cui, V. Degennaro, P. Delage

UMR Agronomie AgroParisTech, Grignon
J. Roger- Estrade

INRA AgroClim, Avignon
N. Brisson

UMR EMMAH, Avignon
A. Chanzy

INRA Agro-impact, Laon-Mons
H. Boizard, J. Leonard, B. Mary

UMR FARE, Reims
P. Defossez

INRA BEF Nancy
Y. Lefevre, J. Ranger

UMR SISYPHE, Université Paris VI
P. Cosenza, A. Tabbagh, J. Tabbagh

INRA InfoSol, Orléans
D. Arrouays, C. Le Bas,

Université de La Rochelle
F. Levêque

INRA Science du Sol, Orléans
I. Cousin

INRA PESSAC, Versailles
O. Duval, D. Tessier, V. Chaplain,

INRA PSH, Avignon
Y. Capowiez

CONTEXTE GENERAL

La préservation des ressources naturelles est 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, il se pose de nombreuses questions sur les sols aujourd'hui quant à leur évolution et à leur dégradation en fonction des changements d'usage et de climat à venir. Le tassement est une des causes possibles de cette dégradation des sols (cf. la communication sur la protection des sols de l'UE de 2002). Le tassement est lié à la mécanisation des activités agricoles et forestières, il résulte des multiples passages d'engins agricoles et forestiers en conditions trop humides. 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.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET DST

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 a proposé une action de recherche sur le tassement des sols agricoles 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 ;
- identifier les conditions, actuelles et à venir, de l'utilisation des sols conduisant à des problèmes de tassement des sols ;
- prévenir l'occurrence de ces conditions ;
- suivre sur le territoire l'évolution des tassements des sols.

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 et de transfert d'eau dans les sols (COMPSOIL, TEC, MIN3P) et de fonctionnement du système sol/plante (STICS) 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). Le projet DST a cherché aussi à développer de nouvelles méthodes non destructives de suivi de l'état du sol (méthodes électriques et magnétiques) pour évaluer la vitesse de régénération de la porosité des sols tassés. Le projet a couvert les sols agricoles et forestiers. C'est un projet transversal qui a associé des laboratoires de recherche travaillant en agriculture dans les domaines biotechniques et économiques, en géophysique ou en génie civil, et des organismes professionnels en charge des grandes cultures, de la vigne ou de la forêt. Il s'est appuyé sur des expérimentations de conduites dans des conditions très variées grâce aux instituts techniques partenaires du projet.

RESULTATS OBTENUS

Les principaux acquis du projet concernent :

- La quantification des effets du tassement sur différents processus biophysiques, par mesures *in situ* et par modélisation : population de vers de terre, drainage, ruissellement et érosion, lixiviation du nitrate, émissions de gaz à effet de serre, rendement, en interaction avec les changements climatiques. Les résultats obtenus permettent de discuter de la notion de sol tassé et de teneur en eau critique : c'est lorsque l'on a une valeur d'indice des vides structuraux inférieure à 0,15 sur au moins 15 cm d'épaisseur qu'on peut considérer un sol comme tassé (masse volumique de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ en sol limoneux). Cet indicateur vient compléter les références obtenues à partir de l'indice S de Dexter, de la Packing Density ou bien de la masse volumique relative.
- L'élaboration d'une méthodologie pour établir la carte des risques de tassement des sols français. La méthodologie est basée sur le nombre de jours durant lesquels une intervention engendre un tassement sévère du sol du fait d'une teneur en eau supérieure à la teneur en eau critique. C'est le modèle STICS qui, paramétré sur la base de la carte des sols français au millionième, calcule l'évolution de la teneur en eau du sol en fonction de la culture et pour 30 années climatiques. Une première cartographie est proposée sur la base d'un paramétrage par défaut du comportement hydro-mécanique des sols français. Elle sera améliorée à partir de l'ensemble des résultats acquis au cours du projet sur la prévision des tassements.
- L'évaluation des méthodes électriques et magnétiques pour la caractérisation et le suivi du tassement. Nos résultats montrent que ces deux méthodes sont aptes à identifier des zones tassées. L'état des connaissances sur la signification du signal électrique est plus avancé : des mesures en conditions sèches et humides permettent de localiser les zones à forte masse volumique. Un test en aveugle est actuellement conduit pour évaluer le degré d'opérationnalité de la méthode.
- La proposition d'un système d'avertissement agricole basée sur la prévision à cinq jours de la teneur en eau des sols à partir du modèle de transferts hydriques TEC. L'ensemble de la démarche a été testé avec succès. Il reste à rendre opérationnel un tel système en partenariat avec la profession agricole.

Les résultats et méthodologies issus du projet DST apparaissent riches et répondent aux objectifs initiaux. Ils sont à consolider en élargissant les conditions pédo-climatiques et agronomiques sur lesquelles le projet s'est appuyé. Un prolongement du projet est en cours avec des économistes pour évaluer les conséquences économiques du tassement et proposer des éléments de politiques publiques permettant de limiter sa fréquence en France.

QUELQUES PUBLICATIONS ISSUES DU PROJET

Thèses

- Cui K., 2008. Vers une approche hydromécanique du comportement des sols cultivés : expérimentations et simulations. Thèse de doctorat de l'AgroParisTech, 21/04/2008. 107 p.
- Lefebvre M.P., soutenance 2009. Prédiction spatialisée de la dégradation physique des sols à l'échelle nationale : confrontation aux données multi-locales du RMQS. Thèse de l'Université d'Orléans.
- Mumen M., 2005. Caractérisation du Fonctionnement Hydrique des Sols à l'aide d'un Modèle Mécaniste de Transfert d'Eau et de Chaleur Mis en Œuvre en Fonction des Informations Disponibles sur le Sol. Thèse de doctorat de l'Université d'Avignon, 120 p.

Articles scientifiques

- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Ruy S., Roger-Estrade J., Boizard H., Richard G., 200X. The influence of tillage type and compaction on earthworm communities in crop fields and consequences for macroporosity and water infiltration. *Applied Soil Ecology*, accepté.
- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment, *Soil Biology and Biochemistry*, accepté.
- Chanzy A., Mumen M., Richard G., 2008. Accuracy of top soil moisture simulation using a mechanistic model with limited soil characterization. *Water Resources Research*, 44, W03432, doi:10.1029/2006WR005765.
- Cui K., Défossez P., Richard G., 2007. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code. *Soil and Tillage Research*, 95, 277-287. Doi: 10.1016/j.still.2007.01.010
- Cui K., Défossez P., Cui Y.J., Richard G., 200X. Soil compaction due to traffic: Evolution of suction during compression. *European Journal of Soil Science*, accepté.
- Défossez P., Keller T., Richard G., 2007. Compaction and compressibility. In: *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd edition, Ed Gregorich, M. Carter (eds), CRC Press.
- Dexter A.R., Czyz E. A., Richard G., Reszkowska A., 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143, 3-4, 243-253. Doi 10.1016/j.geoderma.2007.11.010
- Keller T., Défossez P., Weisskopf P., Arvidsson J., Richard G., 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*, 93, 391-411. Doi: 10.1016/j.still.2006.05.012.
- Levrel G., Ranger J., 2006. Effet des substitutions d'essences forestières et des amendements sur les propriétés physiques d'un alcorisol. Site expérimental de la forêt de Breuil-Chenu, Morvan, France. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 71-88.
- Pereira J., Défossez P., Richard G., 2007. Effect of direct drilling on soil susceptibility to compaction by wheeling. *European Journal of Soil Science*, 58, 1, 34-44. Doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00798.x.
- Roger-Estrade J., Richard G., Dexter A., Boizard H., de Tourdonnet S., Bertrand M., Caneill J., 200X. Integration of spatial and temporal variations of soil structure into models for the design of crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development*, sous presse.
- Saffih-Hdadi K., Défossez P., Richard G., Cui Y.-J., Tang A.M., Chaplain V., 200X An evaluation of the susceptibility of French surface layers soil to compaction at various water contents and bulk densities. *Soil and Tillage Research*, accepté.
- Séger M., Cousin I., Frison A., Boizard H., Richard G., 200X. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, accepté.
- Tabbagh J., Samouëlian A., Cousin, I., Tabbagh A., 2007. Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils. *Journal of Applied Geophysics*, 62, 4, 313-323. Doi: 10.1016/j.jappgeo.2007.01.004.
- Tang A.M., Cui Y.J., Eslami J., Défossez P., 200X. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various agricultural soils. *Geoderma*, sous presse.

MOTS-CLES

Sol, tassement, agriculture, foresterie, vignoble, modélisation, cartographie, teneur en eau, masse volumique, physique du sol, mécanique du sol, géophysique

Liste des participants

Prénom/NOM	Direction/Service	Courrier
Karine ANGELI	AFSSA - DiVE	karine.angeli@noos.fr
Denis ANGERS	Agrocampus Ouest	denis.angers@agrocampus-ouest.fr
Véronique ANTONI	Ifen - CGDD/SOeS/BEME	veronique.antoni@developpement-durable.gouv.fr
Isabelle AVELANGE	INRA de Paris	isabelle.avelange@paris.inra.fr
Christophe BACHOLLE	DIVERGENT - Centre de transfert UTC	c.bacholle@wanadoo.fr
Jérôme BALESDENT	INRA Aix-en-Provence - Unité géochimie des sols et des eaux	Jerome.Balesdent@aix-inra.fr
Marion BARDY	MEEDDAT/CGDD/DRI/SR	marion.bardy@developpement-durable.gouv.fr
Bernard BARTHES	IRD - UR SeqBio	bernard.barthes@mpl.ird.fr
Christian BELLOY	ARD	c.belloy@a-r-d.fr
Catherine BERNARD	Mairie de Paris DEVE - Service Ecologie Urbaine	catherine.bernard@paris.fr
Martial BERNOUX	IRD de Montpellier - UR SeqBio	martial.bernoux@ird.fr
Jacques BERTHELIN	CNRS - UMR 7137 LIMOS - UHP, Nancy1	jacques.berthelin@limos.uhp-nancy.fr
Régis BERTHELOT	ARVALIS - Institut du Végétal	r.berthelot@arvalisinstitutduvegetal.fr
Antonio BISPO	ADEME - ARDESO	antonio.bispo@ademe.fr
Corinne BITAUD	AFSSA - DiVE	c.bitaud@afssa.fr
Marie-Agnès BOURDAIN	SAS Laboratoire	info@saslaboratoire.com
Alain BOUTHIER	ARVALIS - Institut du Végétal	a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr
Alain BRETHES	O.N.F. DT Centre-Ouest Direction Forêt	alain.brethes@onf.fr
Fabrice BUREAU	Université de Rouen - Laboratoire ECODIV	Fabrice.Bureau@univ-rouen.fr
Jean-Yves CAHUREL	Institut Français de la Vigne et du Vin	jean-yves.cahurel@vignevin.com
Philippe CAMBIER	INRA Versailles-Grignon - EGC	pcambier@grignon.inra.fr
Véronique CHAPLAIN	INRA Versailles-Grignon - unité PESSAC	chaplain@versailles.inra.fr
Claire CHENU	INRA Versailles-Grignon - UMR Bioemco	chenu@grignon.inra.fr
Rémi CHAUSSOD	INRA - UMR MSE	remi.chaussod@dijon.inra.fr
Laëtitia CITEAU	AD'MISSIONS	laetitia.citeau@cegetel.net
Jean-Pierre COHAN	ARVALIS - Service conduites et systèmes de culture	jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr
Sébastien CONIL	ANDRA - OPE	sebastien.conil@andra.fr
Pierre CURMI	ENESAD	p.curmi@enesad.fr
Alain DELACOURT	ENGREF - AgroParisTech	delacourt@teledetection.fr
Isabelle DEPORTES	ADEME - ARDESO	isabelle.deportes@ademe.fr

Sylvie DERENNE	CNRS - ENSCP UMR BIOEMCO	sylvie-derenne@enscp.fr
Emmanuel DOELSCH	CIRAD	doelsch@cirad.fr
Jean-Baptiste DOLLE	Institut du Végétal	jean-baptiste.dolle@inst-elevage.asso.fr
Jean-Marcel DORIOZ	INRA de Thonon-les-Bains (Carrel)	dorioz@thonon.inra.fr
Sylvain DOUBLET	SOLAGRO	sylvain.doublet@solagro.asso.fr
Annie DUPARQUE	Agro-Transfert Ressources et Territoires	a.duparque@agro-transfert-rt.org
Odile DUVAL	INRA d'Orléans - Unité des sciences du sol	Odile.Duval@orleans.inra.fr
Pierre FAIVRE	Université de Savoie - CISM	pierre.favre@univ-savoie.fr
Isabelle FEIX	ADEME - ARDESO	isabelle.feix@eme.fr
Irène FELIX	ARVALIS - Institut du végétal	i.felix@arvalisinstitutduvegetal.fr
Patrick FLAMMARION	ONEMA	patrick.flammarion@onema.fr
Laurent FLEUTRY	Chambre d'agriculture de l'Aisne - Pôle Entreprise et Environnement	laurent.fleutry@ma02.org
Ciro GARDI	Commission européenne, GD JRC	ciro.gardi@jrc.it
Cyril GIRARDIN	Laboratoire BIOEMCO	cyril.girardin@grignon.inra.fr
Stéphanie GODON	Ville de Paris - DEVE - SEU - Pollutions des sols	stephanie.godon@paris.fr
Viviane GOLDBERG	Bergerie Nationale - département 3DFI	viviane.goldberg@educagri.fr
Laure GONTIER	Institut Français de la Vigne et du Vin	laure.gontier@vignevin.com
Maritxu GUIRESSE	ENSAT - ECOLB	guiresse@ensat.fr
Sabine HOUOT	INRA Versailles-Grignon - EGC	houot@grignon.inra.fr
Muriel JACOB	APCA - Chargée de missions Déchets et Sols	muriel.jacob@apca.chambagri.fr
Pierre-Alain JAYET	INRA – UMR Economie Publique – Paris-Grignon	jayet@grignon.inra.fr
Lucile JOCTEUR MONROZIER	Conseiller municipal - Environnement et Agriculture	lucile.jocteurmonrozier@orange.fr
Catherine KELLER	CEREGE	keller@cerege.fr
Dominique KING	INRA d'Orléans - Unité des Sciences du Sol	dominique.king@orleans.inra.fr
KLEGOU	AFSSA - DiVE	g.klegou@afssa.fr
Blaise LECLERC	ORGATERRE	blaise.leclerc@wanadoo.fr
Laurent LEMEE	Université de Poitiers - UMR 6514 LSRSN	laurent.lemee@univ-poitiers.fr
Pascale LEPORTIER	KINOME - R&D	pascale.leportier@kinome.fr
Thomas LERCH	INRA AgroParisTech	thomas.lerch@grignon.inra.fr
Xavier LE ROUX	USC1193 Écologie microbienne CNRS-Univ. Lyon I-Soutien INRA	xavierleroux@hotmail.fr
Nicolas LIEBAULT	Doctorant en droit sur la protection des sols	n.liebault@yahoo.fr
Claire LHOUTELLIER	CREED - VEOLIA Environnement	claire.lhoutellier@veolia.com

Luca MARMO	Commission européenne, DG ENV	luca.marmo@ec.europa.eu
Mercedes MENDEZ	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	mendez@lsce.ipsl.fr
Philippe MERCIER	Ville de Paris - Service de l'Ecologie Urbaine	Philippe.mercier@paris.fr
Anne MERLE	ADEME - Direction de la recherche	anne.merle@ademe.fr
Jean-Pierre MONTOROI	IRD	Jean-Pierre.Montoroi@ird.fr
Mikael MOTELICA-HEINO	ISTO - Université d'Orléans	mikael.motelica@univ-orleans.fr
Jérôme MOUSSET	ADEME	jerome.mousset@ademe.fr
Christophe MOUVET	BRGM	c.mouvet@brgm.fr
Adeline PILLET	ADEME - ARDESO	adeline.pillet@ademe.fr
Yves PYTHON	Ferme expérimentale de AgroParisTech - Projet Grignon Energie Positive	python@agroparistech.fr
Katell QUENEA	ENSCP - Laboratoire BIOEMCO	katell-quenea@enscp.fr
Isabelle QUILLERE	INRA de Versailles - NAP	quillere@versailles.inra.fr
Didier RAT	MAP - DGPAAT/SSAD/SDBE/Bureau des Sols et de l'Eau	didier.rat@agriculture.gouv.fr
Guy RICHARD	INRA d'Orléans - Unité des sciences du sol	Guy.Richard@orleans.inra.fr
Agnès RICHAUME-JOLION	Ecologie Microbienne UMR CNRS 5557	richaume@univ-lyon1.fr
Alain RUELLAN	Professeur Emérite - Agrocampus Rennes	ruellan@agropolis.fr
Cornelia RUMPEL	CNRS - BIOEMCO	cornelia.rumpel@grignon.inra.fr
Mamoudou SALIFOU	Direction de la Faune et de la Chasse	faiza032006@yahoo.fr
Joëlle SAUTER	ARAA - Mission sols	j.sauter@bas-rhin.chambagri.fr
Christophe SCHWARTZ	INPL (ENSAIA)/INRA de Nancy, Laboratoire Sols et Environnement	christophe.schwartz@ensaia.inpl-nancy.fr
Laure SOUCEMARIANADIN	Chambre d'Agriculture du Loiret - Service Agronomie	soucemal45d@loiret.chambagri.fr
Véronique SOUCHERE	UMR SADAPT	souchere@grignon.inra.fr
Anne TAUZIET	Institut Français de la Vigne et du Vin	annetauziet@hotmail.fr
Jérôme THIBIERGE	INVIVO - Département Agronomique	jthibierge@invivo-group.com
Sylvie TICO	Chambres d'agriculture de Bretagne	sylvie.tico@morbihan.chambagri.fr
Vincent TOMIS	Agro-Transfert Ressources et Territoires	v.tomis@agro-transfert-rt.org
Francis TROCHERIE	secrétariat du CORPEN	francis.trocherie@developpement-durable.gouv.fr
Matthieu VALE	SAS LABORATOIRE	mvale@saslaboratoire.com
Françoise VERTES	INRA de Rennes	Francoise.Vertes@rennes.inra.fr
Thibaut VEYRIER	PRP - Agronomie	tveyrier@prp.fr
Eric VINDIMIAN	MEDDAT/CGDD/DRI/SR	eric.vindimian@developpement-durable.gouv.fr