



HAL
open science

Stabilisation de la structure du sol et valorisation des matières organiques à l'échelle du système de culture

Safya Menasseri-Aubry

► **To cite this version:**

Safya Menasseri-Aubry. Stabilisation de la structure du sol et valorisation des matières organiques à l'échelle du système de culture. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de Rennes 1, 2015. tel-02796777

HAL Id: tel-02796777

<https://hal.inrae.fr/tel-02796777>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License



Ecole Doctorale Vie-Agro-Santé

Document présenté en vue d'obtenir
l'Habilitation à Diriger des Recherches
(11 mars 2015)

Stabilisation de la structure du sol et valorisation des matières organiques à l'échelle du système de culture

Safya Menasseri-Aubry

Maître de Conférences à Agrocampus Ouest
(CNECA 5)

UP AGAP, Département SVAH
UMR 1069 SAS, Agrocampus Ouest INRA

Composition du Jury :

Rapporteurs :

Isabelle Cousin, Directrice de Recherches, INRA, Orléans
Roel Merckx, Professeur, KU Leven, Louvain, Belgique
Jean Roger-Estrade, Professeur, AgroParisTech, Paris

Examineurs :

Françoise Binet, Directrice de Recherches, CNRS, Rennes
Bernard Nicolardot, Professeur, AgroSup, Dijon
Françoise Watteau, Ingénieur de Recherches, Université de Lorraine, Nancy

SOMMAIRE

Curriculum Vitae	5
Synthèse de l'activité scientifique	21
I. Introduction générale	21
II. Rappel des processus de stabilisation liés aux matières organiques du sol et apportées	23
II.1. Rôle de la matière organique dans la formation et la stabilisation des agrégats	23
II.2. Les facteurs de contrôle biotiques et abiotiques	26
II.2.1. Les facteurs de contrôle biotiques	26
II.2.2. Les facteurs de contrôle abiotiques	27
II.3. Les méthodes de quantification des processus de formation et stabilisation des agrégats	27
III. Objectifs de la recherche menée de 2000 à 2014	28
IV. Approche méthodologique commune à toutes les activités de recherche dont les résultats sont présentés	30
V. Synthèse des principaux résultats de recherche	33
V.1. Etude du potentiel de stabilisation de la structure du sol par les matières organiques restituées au sol	33
V.1.1. Mise en évidence des processus de stabilisation et importance des caractéristiques biochimiques	34
V.1.1.1. Synthèse bibliographique	34
V.1.1.2. Dynamique de la stabilité structurale au cours de la décomposition des produits organiques : approche expérimentale	35
V.1.1.3. Développement du modèle Pouloud	37
V.1.2. Activité biologique, diversité microbienne et processus d'agrégation	41
V.1.2.1. Etude de l'effet de l'interaction entre disponibilité en azote et caractéristiques biochimiques de résidus de cultures sur la dynamique de la stabilité structurale en conditions contrôlées de laboratoire	42
V.1.2.2. Rôle de la diversité microbienne et proposition d'un modèle conceptuel	44
V.1.2.3. Rôle des communautés microbiennes lors de la décomposition de résidus de cultures à C/N contrastés, dans un sol nu, en conditions hivernales	47
V.1.3. Effet de la culture sur le potentiel de stabilisation de la structure du sol des matières organiques restituées au sol	49
V.2. Etude de la dynamique de stabilité structurale selon différentes modalités de travail dans un système de culture fourrager	52
V.3. Effet cumulé des systèmes de cultures contrastés sur la variabilité des niveaux de stabilité structurale des sols cultivés	56
V.4. Conclusion	60
VI. Perspectives	62
VI.1 Validation et généralisation du modèle Pouloud et couplage avec un modèle de compostage	64
VI.2 Vers une meilleure prise en compte des facteurs abiotiques et biotiques et de leurs interactions, y compris dans des approches de modélisation	67
VI.2.1 Rôle du régime hydrique sur la dynamique de l'agrégation	67
VI.2.2 Prise en compte des facteurs biotiques	69
VI.2.3. Intégration de la diversité microbienne dans les approches de modélisation	69
VI.3 Poids des composantes des systèmes de cultures, dans la variabilité des niveaux de stabilité structurale, selon leur position dans un petit bassin versant	71
VI.4 Evaluation de la qualité du sol et des fonctions associées, sous différents systèmes de cultures	72
VII. Conclusion	74
Références bibliographiques	75

Préambule

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de critiquer ce travail et de proposer des pistes d'évolution constructives : Roel Merckx, Isabelle Cousin, Jean Roger-Estrade, Bernard Nicolardot, Françoise Watteau, Françoise Binet.

Je suis agronome car, attirée par les disciplines des sciences de la vie et de la terre et le souci de contribuer à l'atteinte de l'autonomie alimentaire du pays où je suis née. Jeune, j'ai été sensible à la gestion de la quantité de l'eau, un des facteurs limitant cette autonomie alimentaire, et j'ai aimé les enseignements dispensés en hydraulique agricole. La vie allant, je m'intéresse aujourd'hui aux interactions entre les systèmes de culture et la qualité des sols agricoles. La gestion et la valorisation des ressources naturelles sont des éléments clés de la durabilité des formes d'agriculture vers lesquelles nous allons. J'ai vécu différentes expériences scientifiques et professionnelles, dans différents contextes, qui font de moi, non pas une spécialiste d'un domaine précis mais une généraliste dont j'ai décidé d'assumer le statut. Toutes ces expériences, y compris celle d'enseignante que je ne développe pas, m'ont en effet fortement enrichie et je leur dois aujourd'hui le présent document.

Ma culture scientifique s'est construite au fil du temps auprès de Bonjaama Khammari, Raoul Calvet, Sabine Houot, Jean-Alex Molina, William C. Koskinen, Philippe Leterme, Denis A. Angers. Elle s'est nourrie également des échanges avec Valérie Viaud. Je leur adresse ma reconnaissance et remercie Philippe Leterme pour m'avoir fait confiance et avoir permis la réalisation de cette carrière.

Ce travail n'aurait jamais existé sans un certain nombre de personnes qui y ont, fortement contribué et que je remercie chaleureusement. Les résultats présentés ici doivent leur origine à l'esprit d'initiative de Céline Rouan. J'ai eu la chance d'avoir comme premier doctorant Samuel Abiven qui a su, alors que nous partions de rien, mettre en place les premières expérimentations, au laboratoire et au champ, appuyé par Cyril Barrier et contribuer à la mise en place des bases de mon programme de recherche. Puis sont venus Nicolas Bottinelli, Cedric Le Guillou, Jérémy Dénès, apportant chacun des compétences, des idées, des réalisations toutes aussi nouvelles les unes que les autres. Céline Pacault a porté le premier travail réalisé à l'échelle d'un réseau de parcelles. Les perspectives vont vers la modélisation, envisageable grâce à l'implication d'Etienne Le Paven et de Benjamin Louis. Ces résultats sont également le fruit de l'encadrement technique hors pair de Sylvain Busnot aux stabilités structurales, Armelle Racapé aux incubations et biomasses microbiennes, Laurence Carteaux pour les analyses de sucres et d'hyphes mycéliens, Yannick Fauvel et Béatrice Trinkler respectivement pour l'azote minéral et les dosages C et N des sols. Je souligne également l'aide fournie par Hervé Gaillard de l'UR de Sciences du Sol (Orléans), Marjolaine Deschamps et Jean-Noël Rampon de l'UMR Ecosys (Grignon), Mélanie Lelièvre et Samuel Dequiedt de l'UMR Agroécologie (Dijon), Nicole Bissonnette d'Agriculture et Agro-alimentaire Canada (Québec). Les prélèvements de sol sont assurés par le pôle terrain et particulièrement, Sylvain Busnot, Yannick Benard, Rémi Dubois. Karine Derrien et Michèle Beguinél gèrent avec un grand professionnalisme la partie administrative des projets de recherche. J'ai beaucoup appris auprès de Monique Delabuis et Sophie Le Perbec pour la partie bibliographique de ce travail.

Je remercie tous les collègues chercheurs, Nouraya Akkal, Claire Chenu, Pierre-Alain Maron, Cornelia Rumpel, Patricia Garnier, Guenola Pérès, Anne Jaffrezic, Vincent Hallaire, Daniel Cluzeau, Suzelle Barrington, Anne Trémier, et les collègues de la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, plus particulièrement, Djillali Heddadj et Patrice Cotinet, pour la qualité des collaborations que nous avons eu et que nous aurons encore, je l'espère.

Je pense aussi à mes collègues de l'UP AGAP, qui ne sont pas cités, auprès de qui j'ai appris mon métier d'enseignant-chercheur. Nombreux sont les collègues de l'UMR SAS, de l'UP AGAP, d'AGROCAMPUS OUEST, toujours présents pour apporter leur aide, leurs conseils et leurs encouragements. Je les en remercie chaleureusement.

Je remercie Christian Walter pour m'avoir épaulée dans ma fonction d'animation lorsque j'avais besoin de temps et de concentration pour la rédaction de ce document et la préparation de l'oral.

Je termine en exprimant ma reconnaissance à Christine Poutrel dont la présence à mes côtés lors du concours de Maître de Conférences, en 1999, a fortement contribué à ma réussite.

Je dédie ce document à Jean-Marc, Nora et Luka qui éclairent et illuminent ma vie ainsi qu'à une étoile, qui, du ciel, guide mon chemin.

CURRICULUM VITAE

Dr Safya MENASSERI- AUBRY

Née le 8 avril 1967 à Alger (Algérie)

Maître de conférences de l'enseignement supérieur agricole à
Agrocampus Ouest (**AO**), centre de Rennes
Agronomie, 5^{ème} section de la CNECA

UMR INRA/AO 1069 **Sol Agro** et hydrosystèmes et **S**patialisation « SAS »
Equipe de recherches « MO-SOL »

Tel : 00 (33) 2 23 48 54 73 ; E-mail : Safya.Menasseri@agrocampus-ouest.fr
Agrocampus Ouest, Unité pédagogique **AG**ronomie et **Am**élioration des **P**lantés « AGAP »
Département **S**ciences du **V**égétal pour l'**A**griculture et l'**H**orticulture « SVAH »
65, rue de Saint Briec 35042 Rennes Cedex

CURSUS PROFESSIONNEL

- Depuis 2010 Reprise des fonctions d'Enseignant chercheur à Agrocampus Ouest.
- 2009-2010 Délégation pour une année de recherches scientifiques à Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), avec le soutien financier de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE). Québec, Canada.
- 2000-2009 Enseignant chercheur en Sciences du Végétal – option agronomie - Agrocampus Ouest. France.
- 1996 – 2000 Chargée d'études agro-pédologie à ALCYON, bureau d'études en Environnement – Chateaubourg (35), France.
- 1995 Post-Doctorat (10 mois) à l'Université du Minnesota, Department of « Soil-Water and Climate » avec le soutien financier de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE). St Paul Minneapolis, Minnesota, Etats-Unis.

TITRES UNIVERSITAIRES - FORMATION

- 1994 Thèse de doctorat (Agronomie, Environnement) de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon. Directeurs de thèse : Raoult Calvet et Sabine Houot. Jury de thèse : R. Calvet (INA-PG), L. Jocteur-Monrozier (CNRS), B. Saugier (Université Paris-Sud XI), R. Chaussod (INRA Dijon), T. Darbin (UNCAA), S. Houot (INRA Grignon) et J.A.E. Molina (Université de St Paul, Minnesota, U.S.A). Mention très honorable avec les félicitations écrites du jury.
- 1991 Diplôme d'Ingénieur en Agronomie Tropicale (option Maîtrise de l'eau). Centre National d'Etudes Agronomiques dans les Régions Chaudes (CNEARC), Montpellier.
- 1989 Diplôme d'Ingénieur Agronome (option Hydraulique Agricole). Institut National Agronomique d'Alger (Algérie).

FORMATIONS COMPLEMENTAIRES

2012. Formation à l'utilisation de la plateforme INRA « Sol Virtuel » (3 jours)

2012. « Pour une recherche créative et innovante sur la matière organique » - (3 jours) – Ecole chercheur INRA.
2009. « Méta-analyse de données » - (2 jours) – Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec. Canada.
2008. « Ecrire un article scientifique » - (5 jours) – Formation permanente INRA Rennes.
2007. « Caractérisation des matières organiques en relation avec les processus de dégradation et stabilisation » - (4 jours) – Ecole Chercheur INRA.
2004. « Formation Pédagogique » - (5 semaines) – Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes.
2003. « Statistiques – Modèle Normal » - (49 h) – Formation permanente INRA Rennes.
2002. « Connaître les enjeux de la qualification » - (3 jours) – Réseau Agriculture Durable.

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET DE FORMATION

Mots clés : Agronomie générale ; Diagnostics agronomiques ; Gestion des fertilisants organiques ; Gestion des systèmes de cultures ; Qualité des sols ; Matière organique dans les sols cultivés (fonctions, caractérisation, modélisation); Réglementations environnementales ; Plans d'épandage ; Compostage ; Agriculture biologique ; Agroécologie.

Formation initiale (Cours magistraux, travaux dirigés, sorties sur le terrain, travaux de laboratoire, encadrement de projets) :

- L3 et M1 : Connaissances scientifiques de base en agronomie générale et méthodes/outils/démarches de diagnostic agronomique associés aux trois échelles principales que sont la parcelle agricole, le système de cultures et l'exploitation agricole ; méthode de conduite d'une démarche scientifique, enseignements d'ouverture vers l'agriculture tropicale, l'agriculture biologique, l'agroécologie. Responsable de l'activité « Stage en exploitation agricole ».
- M2 : Connaissances scientifiques approfondies concernant l'incidence des pratiques agricoles (travail du sol, rotation de cultures, gestion des résidus de culture, fertilisation organique) sur la dynamique de la matière organique des sols et la fertilité des sols, conséquences sur le fonctionnement des sols cultivés, compréhension des processus et modélisation, optimisation du recyclage des fumiers et autres produits organiques. Encadrement de projets professionnalisant basés sur des enquêtes en exploitations agricoles, en réponse à la demande de professionnels.
- L3, M1 et M2 : Réglementation environnementale.

Dans le cadre de la formation continue, mise en place des formations suivantes :

- Bases agronomiques de la valorisation des effluents d'élevage pour la fertilisation des cultures (4 jours)
- Alternatives aux poursuites en environnement (2 jours)
- Gestion de la fertilité des sols (2 jours)

- Connaissances pour la gestion des effluents d'élevage dans le cadre de systèmes innovants (2 jours)

ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET PEDAGOGIQUES

- **Co-responsable du master 1 (M1) Sciences et Production Végétales (SPV), co-habilitation AO/Université de Rennes 1, depuis 2008 (30 à 50 étudiants / an)**
- Membre élue des
 - Conseil Scientifique (CS) d'AO depuis 2012
 - Conseil des Enseignants (CE) d'AO depuis 2008
 - Conseil d'Administration (CA) d'AO (2008-2012)
 - Conseil de la vie étudiante (CEVE) d'AO (2006-2008)
- Membre du comité d'experts (depuis 2013) et de la commission de parcours (depuis 2010) du campus numérique ENVAM (Environnement et aménagement)
- Membre de jury de soutenances:
 - permanent M1 SPV
 - Validation des Acquis d'Expérience (2009)
 - Ingénieurs agronomes « Ingénierie des Agrosystèmes » /Master 2 « Protev (option PVI) », « Génie de l'environnement » et « Protection des plantes et environnement », licence Pro « Partager »
- Appartenance à des commissions, groupes de travail formels :
 - Membre du comité de pilotage de la réforme pédagogique d'AO, centre de Rennes (2012-2013)
 - Contribution à la Chaire d'excellence « SUBARU », dans le cadre de laquelle je co-encadre la thèse de J. Dénès, dirigée par S. Barrington de l'Université de Concordia (Montréal, Québec, Canada) (2010-2011)
 - Organisation et responsabilité de l'atelier « Sciences et techniques des Productions Végétales » dans le cadre de « La Journée Métiers » (2000-2008) et contribution à la rédaction de fiches Métier du Secteur des Productions végétales.

LISTE DES PUBLICATIONS

A- Publications dans des revues scientifiques à comité de lecture

A1. De rang A :

Le nom du doctorant encadré est souligné.

1. Denes J., **S. Menasseri-Aubry**, A. Tremier, P. Garnier, C. Walter, D. Clugnac, S. Barrington. Prediction of C and N mineralisation of fresh, composted and digested manure and urban waste considering their biochemical characteristics using the CANTIS model. Soumis à Biology and fertility of soils.
2. Denes J., A. Tremier, **S. Menasseri-Aubry**, C. Walter, L. Gratteau, S. Barrington. 2015. Numerical simulation of organic waste aerobic biodegradation: A new way to correlate respiration kinetics and organic matter fractionation. Waste Management. Sous Press.
3. Bottinelli N., **S. Menasseri-Aubry**, D. Cluzeau, V. Hallaire. 2013. Response of soil structure and hydraulic conductivity to reduced tillage and animal manure in a temperate loamy soil. Soil Use and Management, 29, 401-409
4. Pérès G., D. Cluzeau, **S. Menasseri-Aubry**, J.F. Soussana, H. Bessler, C. Engels, M. Habekost, G. Gleixner, A. Weisser, S. Scheu, N. Eisenhaur. 2013. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. Plant and soil, 373, 285-299
5. Le Guillou C., D.A. Angers, P. Leterme, **S. Menasseri-Aubry**. 2012. Over-winter changes in water-stable aggregation are related to crop residue quality. Soil Use and Management, 28, 590-595
6. Le Guillou C., D.A. Angers, P.A. Maron, P. Leterme, **S. Menasseri-Aubry**. 2012. Linking microbial community to soil water-stable aggregation during crop residue decomposition. Soil Biol. Biochem, 50, 126-133
7. Le Guillou C., D.A. Angers, P. Leterme, **S. Menasseri-Aubry**. 2011. Differential and successive effects of residue quality and soil mineral N on water-stable aggregation during crop residue decomposition. Soil Biol. Biochem., 43, 1955-1960
8. Viaud V., D.A. Angers, V. Parnaudeau, T. Morvan, **S. Menasseri-Aubry**. 2011. Response of soil organic matter to reduced-tillage and animal manure in a temperate loamy soil. Soil Use and Management, 27, 84-93
9. Bilal M., A. Jaffrezic, Y. Dudal, C. Le Guillou, **S. Menasseri-Aubry**, C. Walter. 2010. Fluorescence spectroscopy coupled with classification and regression analysis for the discrimination of farm wastes pollution sources during a biodegradation study. Journal of agriculture and food chemistry, 58, 3093-3100
10. Bottinelli N., V. Hallaire, **S. Menasseri-Aubry**, C. Le Guillou, D. Cluzeau 2010. Abundance and stability of belowground earthworm casts influenced by tillage intensity and depth. Soil and Tillage Research, 102, 263-267
11. Akkal-Corfini N., T. Morvan, **S. Menasseri-Aubry**, C. Bissuel-Bélaygue, D. Poulain, F. Orsini. 2009. Nitrogen mineralization, plant uptake and nitrate leaching following the incorporation of (15N)-labeled cauliflower crop residues (brassica oleracea) into the soil: A 3-year lysimeter study. Plant and Soil, 328, 17-26.

12. Abiven S., **S. Menasseri**, C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biol. and Biochem.*, 41, 1-12
13. Abiven S., **S. Menasseri**, D. A. Angers, P. Leterme. 2008. A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Sci. Am. J.*, 72, 119-125
14. Abiven S., **S. Menasseri**, D. A. Angers, P. Leterme. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *Eur. J. of Soil Sciences*, 58, 239-247
15. **Menasseri S.**, W. C. Koskinen, P.Y. Yen. 2004. Sorption of aged dicamba residues in soil. *Pest. Manag. Sci.*, 60, 297-304
16. Gabrielle B., **S. Menasseri**, S. Houot. 1995. Analysis and field evaluation of the CERES Models Water Balance Component. *Soil Sci. Am. J.*, 59, 1403-1412
17. **Menasseri S.**, S. Houot, R. Chaussod. 1993. Field test of biological and chemical methods to estimate the soil nitrogen supply under a temperate climate. *Eur. J. Agron.*, 3, 273-279

A.2. Publications en français dans des revues scientifiques nationales à comité de lecture :

18. Chenu C., S. Abiven, M. Annabi, S. Barray, M. Bertrand, F. Bureau, D. Cosentino, F. Darboux, O. Duval, L. Fourié, C. Francou, S. Houot, C. Jolivet, K. Laval, Y. Le Bissonais, L. Lemée, **S. Menasseri**, J.P. Petraud, B. Verbèque. 2011. 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. *Etude et Gestion des sols*, 18, 161-174
19. Leterme P., **S. Menasseri**. 2006. Nitrogen, rapeseed crop and dairy farms. [Azote, colza et exploitations laitières] *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*, 13(6), 419-425

B- Publications de transfert et guide pratique:

1. Heddadj D., D. Bouvier, P. Cotinet, J. Guil, D. Lebossé, L. Le Roux, J. P. Turlin, G. Pérès, M. Corson, V. Hallaire, **S. Menasseri**, K. Hoeffner, M. Pulleman et J. Faber. 2014. Techniques culturales sans labour. Guide pratique 2014. Chambres d'Agriculture de Bretagne (Ed). 43 p.
2. Decoopman B., **S. Menasseri**, J-M. Collet, C. Porteneuve, A.M. L'Aminot. 2004. Efficacité des amendements organiques sur sol de limon : présentation de l'étude (1^{ère} partie). *Infos-ctifl*, 201, 44-47.
3. Decoopman B., **S. Menasseri**, J-M. Collet, C. Porteneuve, A.M. L'Aminot. 2004. Efficacité des amendements organiques sur sol de limon : résultats et multiples effets (2^{ème} partie). *Infos-ctifl*, 202, 45-49.
4. Khammari B. et **S. Menasseri**. La surexploitation des ressources hydriques. 1991. *El Ardh*, 4, 22-23.

C- Chapitre d'ouvrage :

Fuchs J., S. Genermont, S. Houot, E. Jardé, S. Menasseri, A. Mollier, C. Morel, V. Parnaudeau, M. Pradel, L. Vieublé. 2014. Effets agronomiques attendus de l'épandage des Mafor sur les écosystèmes agricoles et forestiers. Chapitre 3 du rapport final de l'expertise Esco Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usages agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux et socio-économiques, 364-567. <https://inradam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/259227-a73ba-resource-esco-mafor-rapport-chapitre-3.html>

Menasseri S. 2014. Effets des Mafor sur les propriétés chimiques et physiques des sols cultivés, S/chapitre du chapitre 3, 446-458.

Menasseri S., S. Houot and J.A.E. Molina. 1995. Field calibration of the decomposition rate of soil organic pools in the NCSWAP model. C. Giupponi, A. Marani and F. Morari Eds. Modelling the fate of agrochemicals and fertilizers in the environment. European Society for Agronomy, Unipress. 295-314.

D- Thèse et mémoire diplômants

Menasseri S. 1994. *Mise en évidence expérimentale de compartiments dynamiques de la matière organique du sol. Apport de la modélisation et application au champ.* Thèse de Doctorat de l'INA PG, 166p.

Menasseri S. 1991. *Influence des caractéristiques hydriques du sol sur la simulation de la minéralisation et de la dénitrification.* Mémoire de Diplôme d'Ingénieur en Agronomie Tropicale (CNEARC), 55p.

Menasseri S. 1989. *Etude de la recharge artificielle de la nappe de la Mitidja.* Mémoire de Diplôme d'Ingénieur Agronome de l'INA d'Alger, 70p.

E- Rapport final de projet

Menasseri-Aubry S., D. Piron, D. Cluzeau, V. Hallaire, D. Michot, T. Morvan, V. Viaud, V. Parnaudeau, G. Pérès, N. Bottinelli, P. Vandenkoornhuyse, G. Le Floch, G. Barbier, P. Laville, B. Gabrielle, D.A. Angers, D. Heddadj, A. Cottais, P. Cotinet, J.P. Turlin, J.L. Giteau, J. Grall, K. Schreiber, G. Rass, F. Thomas. 2011. Evaluer et modéliser la gestion des matières organiques associée à une réduction du travail du sol en vue d'une agriculture durable. Rapport final, Subvention n°3197 de la Région Bretagne, 210 p.

F- Communications à des colloques internationaux :

1. Pérès G., M. Pulleman, J. Faber, M. Corson, S. Crittenden, V. Hallaire, J. Heddadj, S. Menasseri-Aubry, V. Mikos Sukkel, D. Cluzeau. 2014. Reduced tillage systems for sustainable arable farming in North-West Europe? An integrated assessment of soil properties, soil ecosystem services, and socio-economic aspects. 20th congrès mondial de la Sciences du sol, 8-13 juin, Séoul, Corée. Communication orale.
2. Garrigues E., M. S. Corson, A. Wilfart, S. Menasseri-Aubry. 2014. Effect of on-farm biogas production on impacts of pig production in Brittany, France. The 9th International Life Cycle Assessment of Foods conference, 6-10 october in San Francisco, California. Poster.
3. Tremier A., J. Denes, L. Gratteau, S. Menasseri-Aubry. 2014. Characterization of the biochemical composition of solid organic resources to predict their aerobic biodegradation kinetics. The 5th International Conference on Engineering for waste and biomass valorisation, 25 au 28 Aout, Rio de Janeiro, Brésil. Communication orale.

4. Denes J., **S. Menasseri-Aubry**, A. Trémier, S. Barrington. 2013. Modelling soil aggregate stability dynamics following exogenous organic matter incorporation under laboratory conditions. Quinzième conférence de Ramiran, 3 au 5 Juin, Versailles, France. Communication orale.
5. Viaud V., E. Le Paven, C. Le Guillou, **S. Menasseri-Aubry**. 2013. A modeling approach to simulate microbial processes and C and N dynamics in soils. 4th International Symposium on Soil Organic Matter (SOM 2013), May 5-10, Nanjing, Jiangsu, China. Poster.
6. **Menasseri-Aubry S.**, S. Abiven, N. Akkal, P. Leterme. 2013. Plant growth influences the impact of organic inputs on the temporal dynamics of the soil aggregate stability. 4th International Symposium on Soil Organic Matter (SOM 2013), May 5-10, Nanjing, Jiangsu, China. Communication orale.
7. Le Guillou C., D.A. Angers, P.A. Maron, P. Leterme, **S. Menasseri-Aubry**. 2011. Interactive effects of residue quality and mineral N on short term microbially-mediated soil aggregation dynamics. American Society of Agronomy and Crop Science Society of America and Soil Science Society of America Congress, October 16-19, San Antonio, Texas, USA. Communication orale.
8. Musset G., M.H. Chantigny, I. Royer, D.A. Angers, A. Vanasse, **S. Menasseri-Aubry**, T. Morvan, P. Rochette, D. MacDonald. 2011. Etude lysimétrique de la lixiviation du phosphore selon le type de sol et de fertilisant. 25^e Congrès de l'AQSSS, Mai 2011, Québec, Canada. **Prix du meilleur poster présenté par un étudiant.**
9. **Menasseri-Aubry S.**, D.A. Angers, N. Akkal, F. Vertes, T. Morvan, B. Lemercier, D. Heddadj. 2010. Soil organic carbon and aggregate stability relationship as governed by the diversity of agricultural practises. SOM 2010, Presqu'île de Giens, France. 19-23 septembre. Poster.
10. Le Guillou C., **S. Menasseri-Aubry**, P. Leterme, D.A Angers. 2010. Effet de la disponibilité en azote minéral sur la décomposition de résidus organiques et la stabilisation de la structure du sol. Congrès de l'Association Québécoise de Spécialistes en Sciences du Sol, 1-3 juin, Oka, Québec, Canada. Communication orale.
11. Le Guillou C., **S. Menasseri-Aubry**, P. Leterme, D.A. Angers. 2009. How does organic matter management control stable soil aggregation through microbial activity? Summer school « Soil Organic Matter-composition and turnover », 16-20 mars, Freising, Allemagne. Poster.
12. Pérès G., Y. Cozic, **S. Menasseri-Aubry**, JF Soussana, S. Scheu, N. Elsenhauer, M. Habekost, G. Gleixner, A. Weigelt, D. Cluzeau. 2008. Effects of plant species richness and functional group diversity on soil aggregate stability. EUROSOL. Vienne, Autriche, 25-29 Aout. Poster.
13. Bottinelli N., **S. Menasseri-Aubry**, V. Hallaire, C. le Guillou, S. Busnot, D. Piron, G. Peres, D. Cluzeau. 2008. Tillage and manure effects on soil aggregate stability: temporal

- dynamic and controlling factors under wheat crop. EUROSOIL. Vienne, Autriche, 25-29 Aout. Poster.
14. Abiven S., **S. Menasseri-Aubry**, C. Chenu. 2008. Pouloud, a model to predict the soil aggregate stability dynamics after the input of an organic product. EUROSOIL. Vienne, Autriche, 25-29 Aout. Communication orale.
 15. **Menasseri-Aubry S.**, N. Akkal, C. Pacault, S. Busnot, P. Leterme. 2007. Long-term effect of organic-matter management on soil quality under vegetable cropping systems : What can we learn ? Symposium on Organic Matter Dynamics in Agro-Ecosystems. Poitiers, France. 16-19 Juillet. Poster.
 16. Akkal-Corfini N., S. Lopez-Ridaura, C. Walter, **S. Menasseri-Aubry**, C. Bissuel-Belaygue. 2007. Integrated analysis of vegetable farming systems. The case of Bretagne, West of France. "Farming Systems Design 07" .Catania, Sicile. 10-12 Septembre. Poster.
 17. Vertes F., **S. Menasseri**, T. Morvan. 2005. Long term effect of the length of the grass period in ley-arable rotations on the quality of soil organic matter. 14th N workshop "N management in Agrosystems in relation to the Water Framework Directive". Maastrich, NL, 24-26 oct. Poster.
 18. Abiven S., **S. Menasseri**, B. Deroche, P. Leterme. 2004. Prediction of organic inputs effects on soil structural stability: experimental and modelling approaches. VII ESA Congress. Copenhagen, Danemark. 11-15 Juillet. Poster.
 19. Akkal N., C. Bissuel, **S. Menasseri**, P. Leterme. 2004. Effect of N fertilization of cauliflower crop on C and N mineralization from crop residues (field and laboratory incubation experiments. ISHS Symposium "Towards ecological sound fertilisation strategies for field vegetable production" Perugia, Italie. 7-10 Juin. Poster.
 20. Abiven S., **S. Menasseri**, P. Leterme. 2003. Effects of added organic matter quality on soil properties: dynamics of carbon and structural stability along the decomposition. 225th ACS meetings, Molecular studies of soil Organic matter symposium. Nouvelle Orléans, USA. 22-27 Mars. Communication orale.
 21. **Menasseri S.**, S. Houot, J.A.E. Molina et H.H. Cheng. 1995. Simulation of dynamic of nitrate and active organic matter pools in soils. 210^{ème} Congrès de l'American Chemical Society, Chicago USA. Aout. Poster.
 22. **Menasseri S.** et S. Houot. 1994. Characterization and dynamic of the organic matter extracted by autoclaving in three french soils. 8^{ème} workshop sur l'azote, Université de Ghent, Faculté de l'Agriculture et des Sciences Biologiques appliquées, Gent, Belgique. 5-8 septembre. Poster.
 23. **Menasseri S.**, S. Houot et J.A.E. Molina. 1994. Field calibration of the decomposition rate of organic pools in NCSWAP model. Workshop international : Modeling the fate of agrochemicals and fertilizers in the environment. Instituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venise, Italie. 3-5 mars. Poster.

24. **Menasseri S.**, S. Houot et R. Chaussod. 1993. Test of different methods of nitrogen mineralization measurement. 1993. Symposium : Nitrogen mineralization in agricultural soils. DLO-Institute for Soil fertility Research, Haren, Pays Bas. 19-20 avril. Communication orale.

G- Communications à des colloques nationaux :

1. Garrigues E., M. Corson, **S. Menasseri-Aubry**, A. Wilfart. 2015. Effet de l'implantation d'une unité de méthanisation sur l'impact de la production de porc : cas d'une ferme en Bretagne. 47èmes Journées de la Recherche Porcine. Paris, France. 3-4 février. Communication orale.
2. Le Guillou C., **S. Menasseri-Aubry**, G. Le Floch, G. Barbier, D. Angers, P. Leterme. 2009. Les matières organiques exogènes et natives influencent la stabilisation de la structure du sol : expérimentation et modélisation. 10^{èmes} journées d'Etude des Sols. Strasbourg, France. 11-15 mai. Communication orale.
3. Bottinelli N., V. Hallaire, **S. Menasseri-Aubry**, C. Le Guillou, D. Cluzeau. 2009. Stabilité structurale des déjections lombriciennes soumises à différentes intensités de travail du sol. 10^{èmes} journées d'Etude des Sols. Strasbourg, France. 11-15 mai. Communication orale.
4. **Menasseri S.** et W. Koskinen. 1996. Caractérisation de la disponibilité du dicamba dans un sol sablo-limoneux. Etude de l'effet d'un amendement organique. 5^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols : Sols et transferts des polluants dans les paysages. Rennes, 22-25 avril. Communication orale.
5. **Menasseri S.** et R. Calvet. 1992. Modélisation du cycle de l'azote dans le système sol-plante-eau: Etude de sensibilité du modèle NCSWAP. 3^{èmes} Journées nationales de l'Etude des Sols. Lausanne, Suisse. 8-10 septembre. Communication orale.

H- Communication à des conférences et journées techniques :

1. Busnot S., **S. Menasseri-Aubry**, M. Pulleman, S. Crittenden, J.H. Faber, G. Peres. 2012. Analyse de la stabilité structurale des sols cultivés. Journées techniques de la mesure J2M. 8-11 octobre, Pontivy. Poster.
2. **Menasseri-Aubry S.**, S. Barrington. 2011. Les travaux de la chaire internationale SUBARU de Suzelle Barrington. Conférence de la recherche UBS Vannes, 13-14 octobre, Vannes. Communication orale.
3. Viaud V., **S. Menasseri**, D.A. Angers, V. Parnaudeau, T. Morvan. 2009. Effet des TCSL sur le stockage de carbone dans le sol. Forum Agrofutur, Pontivy. Communication orale.
4. Parnaudeau V., T. Morvan., D. Heddadj, V. Viaud, **S. Menasseri**. 2009. Effet des TCSL sur la dynamique de l'azote. Forum Agrofutur, Pontivy. Communication orale.
5. Hallaire V., **S. Menasseri**, N. Bottinnelli. 2009. Effet des TCSL sur les propriétés physiques du sol. Forum Agrofutur, Pontivy. Communication orale.

6. Laville P., T. Morvan, V. Parnaudeau, **S. Menasseri**. 2009. Effet des TCSL sur les émissions de gaz à effet de serre. Forum Agrofutur, Pontivy. Communication orale.
7. Le Guillou C., **S. Menasseri-Aubry**, G. Le Floch, G. Barbier, D.A. Angers. 2009. Différenciation de la flore fongique au cours de la stabilisation de la structure d'un sol par apports organiques. Séminaire matières organiques et environnement, 25-28 janvier, Sainte-Maxime, France. Poster
8. **Menasseri-Aubry S.** 2007. Freins et motivations du développement du colza dans les exploitations d'élevage bovin de l'ouest. Rencontre technique régionale du Cetiom. 1^{er} février 2007, Rennes. Communication orale.
9. Decoopman B., **S. Menasseri-Aubry**, S. Abiven. 2007. Quelles relations entre caractérisation en laboratoire des matières organiques et effets sur le sol suite à des apports ? Des références en Bretagne en zones légumières sur sol de limon sur 8 années. Journée technique « Retour au sol des produits résiduels organiques » organisée par l'INRA de Colmar et la mission recyclage agricole du Haut Rhin. Poster.
10. Cabaret M.M., J.P. Arzul, T. Morvan, **S. Menasseri**. 2007. Incidence des restitutions carbonées sur le rendement du maïs ensilage et l'évolution du sol. 8èmes rencontres de la fertilisation et de l'analyse de terre, Blois, 20-21 novembre. Poster.
11. Abiven S., **S. Menasseri**, S. Busnot, P. Leterme. 2006. Prédiction de l'effet des apports organiques sur la stabilité structurale : approches expérimentale et de modélisation. Journées "Les matières organiques en France. Etat de l'art et Perspectives". Carqueiranne, France. 22-24 Janvier. Poster.
12. Vertès F., **S. Menasseri**, T. Morvan. 2006. Evolution qualitative et quantitative à long terme de la matière organique des sols en rotations fourragères. Journées "Les matières organiques en France. Etat de l'art et Perspectives". Carqueiranne, France. 22-24 Janvier. Poster.

I- Animations Scientifiques

1. **Menasseri-Aubry S.**, V. Viaud, F. Vertès, A. Wilfart, A. Jaffrezic. 2013. Stockage du carbone et dynamique de la matière organique. Animation scientifique UMR SAS, 4 novembre, Rennes.
2. **Menasseri-Aubry S.** 2012. Bénéfices de la matière organique dans les sols cultivés. Journée MO, unité GERE, Irstea, 11 octobre, Rennes.
3. **Menasseri-Aubry S.** 2010. Impact des systèmes de cultures sur la stabilité structurale des sols. Les séminaires du centre d'Agriculture Agroalimentaire Canada de Québec, 29 avril, Québec, Canada.
4. **Menasseri-Aubry S.** 2007. Point sur un indicateur d'impact des pratiques agricoles : La stabilité structurale des sols. Animation scientifique UMR SAS, 10 Mai, Rennes.

5. **Menasseri S.** 2005. Contexte et enjeux du compostage. Ingénierie des amendements : le cas du compostage. Animation scientifique du CAREN, 10 février, Rennes.
6. **Menasseri S.** et W. Koskinen. 1995. Formation of dicamba bound residues in soils. Séminaire présenté au département des Sol, Eau et Climat de l'Université du Minnesota, 10 décembre, St Paul, USA.

J- Publications pédagogiques

Modules d'enseignement numérique (Site Campus numérique ENVAM. <http://sfc.univ-rennes1.fr/environnement/envam.htm>) :

1. **Menasseri-Aubry S.**, C. Walter, D. Cluzeau, V. Parnaudeau, G. Peres, D.A. Angers, V. Viaud, T. Morvan, A. Jaffrezic. 2010. Le devenir des matières organiques dans les sols.
2. **Menasseri-Aubry S.**, A. Vanasse, R. Daniellou. 2010. Production et valorisation durable de bioressources à finalité chimique et énergétique. (Partenariat avec l'U Laval, Québec, Canada)
3. Leterme P., **S. Menasseri.** 2005. Gestion des éléments fertilisants à risques (azote et phosphore) dans les exploitations agricoles.
4. Leterme P., **S. Menasseri**, C. Bissuel. 2003. Agronomie générale.

Valorisation des travaux des étudiants (Rapports/articles de fin de projet professionnalisant M2)

1. Leterme P., B. Louis, **S. Menasseri-Aubry**, V. Viaud. 2014. Perception de la qualité des sols par les agriculteurs adhérents des coopératives Agrial, Terrena et Triskalia. (10 pages)
2. **Menasseri S.** et P. Leterme. 2005. Enquêtes sur le développement du colza dans les exploitations d'élevage bovin de l'Ouest. Freins et motivations. (27 pages + annexes).
3. **Menasseri S.** 2004. Enquêtes sur les conduites des cultures dans les exploitations agricoles du bassin versant de Naizin (Morbihan) en 2004. (18 pages + annexes).
4. Leterme P., A. Le Ralec et **S. Menasseri.** 2003. Evaluation de l'impact de l'adaptation des pratiques de fertilisation sur l'amélioration de la qualité de l'eau. Bassin de l'Andainette. (30 pages+annexe)
5. Leterme P. et **S. Menasseri.** 2002. CTE en Côtes d'Armor : Etats des lieux et perspectives. (32 pages + annexes).

ACTIVITES DE FORMATION A LA RECHERCHE

A- Encadrement de thèses de Doctorat (Ecole Doctorale VAS):

1. B. Louis. 2013-2016. Modélisation de la dynamique des matières organiques et populations microbiennes dans les sols sous systèmes d'Agriculture Ecologiquement Intensive (AEI). Co-encadrement assuré avec V. Viaud (UMR INRA/AO SAS) et P. Leterme (Directeur de thèse).

2. J. Dénès. 2011-2014. Evaluation intégrée des phases de traitement et de recyclage agricole des matières organiques pour une optimisation des effets environnementaux et agronomiques. Co-encadrement assuré avec A. Tremier (Irstea, Rennes) et S. Barrington (U. Mc Gill, Canada) (Directrice de thèse).
3. C. Le Guillou. 2008-2011. Etude des variations de la biodiversité microbienne et de la stabilité structurale des sols sous l'action de différents modes de gestion organique. Co-encadrement assuré avec D.A. Angers (Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Canada) et P. Leterme (Directeur de thèse).

Devenir : Chercheur permanent en agropédologie (Axe : Connaissance et Amélioration des Agrosystèmes) à l'Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC) après un Post-doctorat à l'UMR INRA/Université de Bourgogne « Agroécologie », Dijon

4. N. Bottinelli. 2006-2009. Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage: rôle de l'activité lombricienne. Co-encadrement assuré avec D. Cluzeau (UMR Ecobio, Université Rennes 1) et V. Hallaire (UMR INRA/AO SAS) (Directeur de thèse).

Devenir : CR2 à partir du 1^{er} février 2015 à l'UMR 242 iEES Paris, Equipe BioPhys, IRD, Bondy après des Post-doctorats à l'UR 1037 Biogéochimie des écosystèmes forestiers, INRA Nancy et à l'Institut de Science du sol de l'académie chinoise des Sciences, Nanjing, Chine

5. S. Abiven. 2000-2004. Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Co-encadrement assuré avec P. Leterme (Directeur de thèse).

Devenir : Senior Scientist depuis 2008 au Soil Science and Biogeography Unit, University of Zurich, actuellement responsable d'équipe.

B- Encadrement de Masters 1 et 2 :

1. A. Uwantege. 2014. *Master 1 Sciences et Productions Végétales (Université Rennes 1, Agrocampus Ouest)*. Caractérisation du devenir de produits organiques basée sur leurs caractéristiques biochimiques en vue de prédire leur effet sur les processus de minéralisation du carbone et de l'azote et d'agrégation et de stabilisation dans les sols.
2. A. Omari. 2014. *Master 2 Sol: fonctionnement, organisation et gestion (AgroParisTech, UPMC)*. Impact du régime hydrique et des entrées de carbone sur l'agrégation du sol et sur la distribution et la qualité du carbone au sein des agrégats. Co-encadrement avec Cornelia Rumpel, UMR BiomCo.
3. D. Clugnac. 2013. *Master 2 "FAGE, Spécialité Biologie des Interactions Plantes Environnement (Université de Lorraine)*. Etude de la stabilité des agrégats d'un sol limono-argileux suite à l'apport de produits résiduels organiques bruts et transformés.
4. E. Le Paven. 2012. *Master 2 Modélisation des systèmes biologiques*. Modélisation de la dynamique de la stabilité structurale du sol après incorporation de résidus végétaux par la prise en compte de processus microbiens. Co-encadrement avec Valérie Viaud, UMR SAS, INRA Rennes.

5. G. Musset. 2011. *Master 2 PRO Biovigpa Pro (Université Rennes 1, Agrocampus Ouest)*. Etude lysimétrique de la lixiviation de l'azote et du phosphore dans deux différents types de sols avec différents effluents d'élevage. Co-encadrement avec Martin Chantigny, Agriculture et Agroalimentaire, Canada, dans le cadre du CFQCU.
6. E. Thiot. 2009. *Master 2 Hydropédologie, Hydrogéologie, Hydrobiogéochimie (Université Rennes 1, Agrocampus Ouest)*. Réalisation d'un indicateur agrégé de qualité des sols cultivés et caractérisation de l'impact des pratiques culturales sur la qualité des sols. Co-encadrement avec Denis A. Angers, Agriculture et Agroalimentaire Canada.
7. C. Le Guillou. 2008. *Master 2 Bassin Versant Eaux Sols (Université Rennes 1, Agrocampus Ouest)*. Dynamique de la flore fongique et de la stabilité des agrégats d'un sol limoneux cultivé soumis à des apports organiques. Co-encadrement avec G. Le Floch et G. Barbier, Université de Bretagne Occidentale (UBO).
8. C. Le Guillou. Juin 2007. *Master 1 Gestion Intégrée des bassins Versants (Université Rennes 1, Agrocampus Ouest)*. Suivi de la stabilité structurale d'un sol cultivé en fonction des apports organiques ou minéraux et des techniques de travail du sol.
9. C. Pacault. 2005. *DAA Sciences et techniques des Productions Végétales, Option « Ingénierie des agrosystèmes » Agrocampus Ouest*. Impact des systèmes de culture sur la qualité du sol et de l'eau : Cas des systèmes légumiers de plein champ du Nord Finistère. Co-encadrement avec N. Akkal (UMR SAS).
10. C. Rouan. 2001. *DAA Génie de l'Environnement, option « Sol et aménagement » Agrocampus Ouest*. Effets d'amendements organiques sur la stabilité structurale de sols limoneux en système légumier breton.

C- Comités de Pilotage de thèses :

1. A. Askri « Valorisation agronomique des digestats » Directrice de thèse S. Houot. (thèse en cours)
2. C. Grosbellet « Influence de l'incorporation de composts de déchets organiques urbains sur les propriétés physiques et hydriques d'un anthroposol reconstitué » Directeur de thèse S. Charpentier (Encadrants : Laure Beaudet et Virginie Caubel). (thèse soutenue en 2007).
3. D. Piron « Impact des lombriciens sur le fonctionnement du sol. Vers une caractérisation des faciès de bioturbation » Directeur de thèse. P. Morand (Encadrant : D. Cluzeau). (thèse soutenue en 2007).
4. M. Annabi « Effets des apports de composts d'origine urbaine sur les propriétés physiques des sols limoneux » Directeur de thèse LM Bresson (Encadrants : S. Houot et Y. le Bissonais). (thèse soutenue en 2006).
5. N. Abdel Kader « Variabilité des bilans gazeux et de la valeur agronomique des composts selon le procédé de compostage » Directeur de thèse : P. LETERME. (thèse soutenue en 2004).

6. C. Barre « Devenir de l'azote des pissats de vache émis sur une prairie pâturée ». Directeur de thèse : P. LETERME. (thèse soutenue en 2001).

D- Jury de thèse (examinatrice) :

1. T.P. Ngo, 2014. Effets des amendements organiques exogènes sur la qualité de la matière organique et le stockage du carbone d'un sol dégradé par l'érosion dans le Nord Vietnam, 06/05/2014, Université de Pierre et Marie Curie.
2. S. Rokia, 2014. Contribution à la modélisation du processus d'agrégation et du transfert d'éléments nutritifs dans des technosols construits à partir de déchets, 10/01/2014, Université de Lorraine.
3. K. Kintché, 2011. «Analyse et modélisation de l'évolution des indicateurs de la fertilité des sols cultivés en zone cotonnière du Togo », 24/11/2011, Université de Bourgogne.
4. D. Cosentino, 2006. Contribution des matières organiques du sol à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme, 15/12/2006, INA-PG.

ACTIVITES D'ANIMATION ET D'EVALUATION DE LA RECHERCHE

A- Responsabilités

- **Animatrice de l'équipe MO-SOL de l'UMR INRA/AO SAS depuis 2012¹**
- Membre du Directoire scientifique du Système d'observations et d'expérimentations sur le long-terme pour la recherche en environnement sur les produits résiduaux organiques « SOERE PRO » depuis 2014
- Membre du comité de qualification Agriculture Raisonnée et de certification Globagap de l'organisme certificateur CERTIS (2006-2012)
- Membre du Conseil Scientifique de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (2005-2013)
- Membre du comité d'évaluation des Bourses Demolon offertes par l'Association Française de l'Etude des Sols, pour la participation aux colloques « Journées Nationales d'Etude des Sols » (2007 et 2011)
- Membre de jury de recrutement:
 - Maître de conférences à AgroParisTech (2013)
 - Ingénieur d'Etudes INRA, concours externe (2008)
- Membre de comités scientifiques d'organisation de colloques national et international:

¹ Prise en charge de la rédaction du projet de l'équipe pour l'évaluation AERES qui a eu lieu en 2010

- 39^{èmes} Journées scientifiques du Groupe Francophone Humidité et Transferts en milieux poreux (GFHN) « Milieux poreux dans les contextes urbain et péri-urbain », Angers, 17-19 nov 2014
- 15th RAMIRAN International Conference, « Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services » - Versailles, 3-5 juin 2013

B- Contribution aux expertises suivantes

- 2013-2014 Expertise collective INRA ESCO Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usages agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux et socio-économiques, commanditée au CNRS, l'INRA et l'Irstea par les ministères chargés de l'Agriculture et de l'Ecologie.
- 2007 Plan d'épandage collectif (touchant 84 communes) du GIE « Terre et Eau » à la demande de la préfecture d'Ille et Vilaine.
- 2006 Evaluation du dispositif agro-environnemental Basse-Normandie, animée par le laboratoire INRA SAD de Corte-Corse.

C- Relecture d'articles pour des revues nationales et internationales (2000-2014):

Etude et gestion des sols (3), Fourrages (2), Soil Biology and Biochemistry (1), Canadian Journal of Soil Science (1), Geoderma (1), Soil use and management (3), Soil Science Society and American Journal (3), Microbial Ecology (1), Soil Biology and Fertility (1), Soil Research (1).

CONTRATS DE RECHERCHES

A- Coordination

- 2012-2015 Programme Reactif (Ademe) « ETYC », **E**valuation intégrée des phases de **T**raitement et de **recY**clage agricole des matières organiques pour des systèmes d'élevage moteurs dans l'atténuation du changement **C**limatique. (200000 euros)
- 2011 Programme de partenariat stratégique en matière d'enseignement et de recherche avec le Québec CFQCU. Gestion de la fertilisation organique associée à la réduction du travail du sol : Conséquences sur la qualité du sol, les cultures et l'environnement dans deux contextes pédo-climatiques contrastés. Co-coordination avec A. Vanasse, Professeure titulaire à l'Université Laval, Québec, Canada (22000 euros).
- 2007-2010 Programme PRIR (Programme de recherche d'intérêt régional) « MO-TCS »: Evaluer et modéliser la gestion des matières organiques associée à une réduction du travail du sol en vue d'une agriculture durable. Co-coordination avec Daniel Cluzeau de l'UMR Ecobio (135000 euros)

B- Participation

- 2012-2015 Programme Agrobiosphère (ANR) « MOSAIC » : Approche à l'échelle du paysage de la dynamique des **M**atières **O**rganiques des **S**ols dans des systèmes **A**gricoles **I**ntensifs liés à l'élevage, et dans un contexte de **C**hangements globaux. Co-responsable du workpackage 1 «Quantify variability and co-variability existing at landscape scale». Coord. V. Viaud de l'UMR SAS (729086 euros)
- 2011-2014 Programme européen Eranet-Snowman « SUSTAIN »: Soil Functional Biodiversity and Ecosystem Services, a Transdisciplinary Approach. Coord. G. Pérès (Université Rennes 1, UMR SAS) (218000 euros)

2004-2007 Programme GESSOL (gestion durable du patrimoine sol) « MO-STAB » : Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. Coord. C. Chenu de l'UMR BiomCo

C- Conventions de recherches

2005 Effet de l'introduction d'une céréale à paille et d'une fumure organique dans les systèmes de cultures légumiers spécialisés du Nord Bretagne, sur la qualité du sol et conséquence sur la qualité de l'eau – bilan après 4 années de modification de pratiques (Convention entre Agrocampus Ouest, La Chambre d'Agriculture du Finistère et l'Association de Réflexion Clédéroise pour une Agriculture Durable)

2006 Effet des matières organiques sur les propriétés physiques du sol dans les systèmes de culture légumiers (Convention entre l'UMR SAS et le centre expérimental de la Rimbaudais)

PARTENARIAT PROFESSIONNEL

Les partenaires professionnels ont été et sont :

- Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) dans le cadre des projets MO-TCS, SUSTAIN et ETYC et des conventions de recherche en zone légumière.
- Coopératives (Agrial, Triskalia et Terrena) regroupées 3 Ecoles (Agrocampus Ouest, ESA d'Angers et Oniris de Nantes) dans le cadre de la Chaire d'Agriculture Ecologiquement Intensive (AEI). Cette chaire finance, pour moitié, la thèse de Benjamin Louis. Dans son cadre, je participe à la formation continue des techniciens des coopératives.
- Coopérative Terres de St Malo et le Centre technique au sein de la filière fruits et légumes (CTIFL) pour les travaux réalisés dans les stations expérimentales légumières.
- Union des Coopératives Agricoles d'Agrofourniture (Financement de ma thèse de Doctorat)

SYNTHESE DE L'ACTIVITE SCIENTIFIQUE (2000-2014)

Après une introduction générale, un bref rappel bibliographique justifiant les questions de recherche est réalisé. Puis l'approche méthodologique, commune aux différents travaux et mise en œuvre aux différentes échelles spatiales allant du microcosme en conditions contrôlées de laboratoire, aux micro-parcelles d'essais agronomiques classiques jusqu'au réseau de parcelles cultivées, est présentée. L'objet d'étude dans tous les cas est l'agrégat de sol, la propriété du sol au cœur de ces travaux, la stabilité structurale et l'échelle d'approche privilégiée, le système de cultures. Les principaux résultats sont ensuite développés avant de terminer le document par une proposition de perspectives de recherches.

I. Introduction générale

Un des enjeux majeurs que connaît notre société, est le recyclage des matières organiques produites par les différents secteurs d'activités, justifié par l'intérêt croissant d'optimisation de leur valorisation agronomique dans les terres agricoles. Par ailleurs, l'érosion et la diminution des teneurs en matières organiques des sols (MOS), sont des menaces considérées comme importantes au niveau européen. Certaines zones cultivées sont caractérisées par des baisses de teneurs en matières organiques et un risque érosif associé croissant. C'est le cas de la Bretagne où la baisse des teneurs en matières organiques serait à relier au retournement des prairies au profit des cultures annuelles fourragères (Gis, 2011). La restitution importante des effluents d'élevage aux sols ne suffisant pas, la promotion de l'agro-écologie au sein des systèmes de production agricole qui implique l'optimisation de la gestion des intrants, la diversification des successions culturales et la simplification du travail du sol, pourrait inverser cette tendance.

La structure du sol est une des plus importantes propriétés du sol qui affecte à la fois les fonctions de production du sol – elle détermine la capacité de germination de pénétration et de croissance des racines (Lynch et Bragg, 1980 ; Richard et Boiffin, 1990 ; Angers et Caron, 1998), la circulation de l'eau et de l'air -, ainsi que les fonctions environnementales liées au rôle tampon du sol vis-à-vis des risques d'érosion et de dégradation (Amezteka, 1999 ; Bissonais et al., 2002 ; Pagliali et al., 2004) et de séquestration du carbone (Jastrow and Miller, 1997). La structure du sol peut être définie par sa forme, sa stabilité (Amezteka, 1999) et sa résilience. La forme décrit l'arrangement hétérogène des solides et des vides existant dans le sol à un temps donné. La stabilité de la structure d'un sol (stabilité structurale) est sa capacité à conserver son arrangement entre particules solides et vides lorsque le sol est exposé à une contrainte. La contrainte la plus étudiée dans la littérature est l'action de l'eau (Chenu et Cosentino, 2011). La résilience est la capacité d'un sol à retrouver sa forme structurale grâce à des processus naturels lorsque les contraintes appliquées s'atténuent ou cessent. De ce fait, la structure d'un sol et sa stabilité évoluent dans le temps et il convient de disposer d'outils pour suivre ces évolutions. Les propriétés du sol qui contribuent à la formation et la stabilisation des agrégats comprennent la texture, la minéralogie des argiles, les cations échangeables, les oxydes de fer et d'aluminium, le carbonate de calcium et la matière organique (Le Bissonais, 1996). Cette dernière constitue le principal agent agrégeant dans notre contexte de sol limoneux et de climat tempéré. Elle est également la propriété sur laquelle l'homme peut agir par le choix du système de culture qu'il met

en œuvre. Ce rôle de la matière organique est d'autant plus déterminant dans les sols limoneux, intrinsèquement sensibles à la dégradation du fait de leur texture qui leur confère une faible cohésion (Le Bissonnais et Arrouays, 1997). Par ailleurs, la formation d'agrégats stables est un mécanisme dominant de la stabilisation du carbone organique. Les stratégies qui lui sont favorables doivent être recherchées (Puget et al., 2005).

Dans ce contexte, je me suis particulièrement intéressée à l'effet des matières organiques sur la stabilité structurale, ainsi qu'aux processus mis en jeu liés à la dynamique de ces matières organiques. Même si conceptuellement ces processus sont connus, l'importance de leur contribution dans les phénomènes d'agrégation et de stabilisation de la structure du sol selon les contextes pédoclimatiques et de systèmes de cultures, au cours de la dynamique de décomposition de matière organique restituée au sol, l'est moins. Ces matières organiques sont très diversifiées que ce soit au niveau des résidus de cultures, ou des effluents organiques solides et liquides, bruts ou transformés par différents procédés. Il est apparu nécessaire de mettre en place des relations génériques entre les caractéristiques des produits organiques (quantité et qualité du carbone entrant), les conditions de leur application dans le sol, les dynamiques des facteurs agrégeants et les dynamiques de stabilité structurale.

L'impact des systèmes de cultures sur la matière organique du sol et donc sur la stabilité structurale du sol varie en fonction des rotations pratiquées (espèces, résidus de cultures, exsudats racinaires), du type de travail du sol, des produits organiques restitués au sol (engrais et amendements organiques) en termes de quantité, qualité et fréquence, de disponibilité en azote minéral et autres éléments du système de culture pouvant affecter l'environnement physico-chimique des micro-organismes du sol (Monnier et al., 1965 ; Hadas et al., 1994; Tejada and Gonzalez, 2005). Ces derniers sont les agents primordiaux de la biodégradation des matières organiques du sol et acteurs majeurs responsables de la formation, stabilisation et destruction des agrégats du sol (Chenu et Plante, 2006). En effet, même s'il est clair que la plupart des sols présentant des teneurs en matières organiques élevées présentent des niveaux de stabilité structurale élevés (figure 1), l'accroissement de la teneur en MO n'est pas le seul mécanisme par lequel la formation d'agrégats et leur stabilisation sont augmentées (Weill et Magdoff, 2004).

Parmi ces éléments du système de cultures nous nous sommes particulièrement intéressés aux :

- **Apports de produits organiques.** Nous nous sommes essentiellement intéressés aux effluents d'élevage bruts ou transformés et aux résidus de cultures. Un enjeu important auquel notre travail doit contribuer est l'optimisation de la valorisation agronomique des effluents organiques divers restitués au sol en explorant les relations entre la qualité de ces produits et la stabilité structurale des sols et en tenant compte de la diversité des systèmes de cultures au sein desquels ces produits sont valorisés. Parmi ces produits organiques, certains sont issus de procédés de transformation tels que le compostage et la méthanisation qui modifient considérablement la qualité biochimique des produits bruts initiaux, donc leur potentiel de décomposition dans le sol et leur impact sur les processus de stabilisation de la structure du sol.
- **Différentes modalités de travail du sol.** En France l'introduction et le développement des techniques sans labour sont récents mais prennent de plus en plus d'ampleur. Elles concernent 36 % des surfaces en France et 24 % en Bretagne en 2011 (Heddadj et al.,

2014). Un des enjeux est le stockage du carbone qui est souvent associé à ces techniques (Metay et al., 2009). Peu de références ont été publiées en France et un travail de compréhension des mécanismes par lesquels les propriétés du sol et les fonctions associées sont impactées dans notre contexte de sols limoneux, de climat tempéré et de systèmes de cultures caractérisés par une forte restitution de carbone, est nécessaire.

- **Systèmes de cultures dans leur globalité.** Une diversité de systèmes de cultures caractérise la Bretagne. Cette diversité comprend les types de successions culturales qui conditionnent la fréquence du travail du sol et les types de produits organiques apportés au sol. La répartition géographique dépend souvent du climat de la région et du système de production, notamment de l'association ou non, sur l'exploitation, avec un atelier d'élevage et du type d'atelier d'élevage. Ces successions sont soit exclusivement légumières, soit légumières en rotation avec des céréales, soit céréalières en rotation avec des prairies temporaires ou non, des prairies permanentes. Ces systèmes de cultures modifient sur le long terme la quantité et la qualité de la matière organique du sol (MOS) et, de ce fait, peuvent moduler les effets des produits organiques sur la stabilité structurale du sol.

II. Rappel des processus de stabilisation liés aux matières organiques du sol et apportée

II.1. Rôle de la matière organique dans la formation et la stabilisation des agrégats

Le rôle de la matière organique dans les processus de formation et de stabilisation des agrégats bien que reconnu n'est pas encore très clair. Des relations significatives entre la teneur en MO du sol (MOS) et la stabilité structurale (figure 1) ont été mises en évidence (Le Bissonnais et Arrouays, 1997; Bronnick et Lal, 2005). Selon le modèle hiérarchique de Tisdall et Oades (1982), le type de MOS impliqué dans l'agrégation varierait selon la taille des agrégats (micro-agrégats ou macro-agrégats) allant des substances humifiées à l'échelle fine aux structures microbiennes grossières à l'échelle millimétrique. Ce modèle est en accord avec les observations au champ voulant que ce sont surtout les macroagrégats qui varient rapidement sous l'influence de changements dans les systèmes de culture (Chantigny et al., 1996).

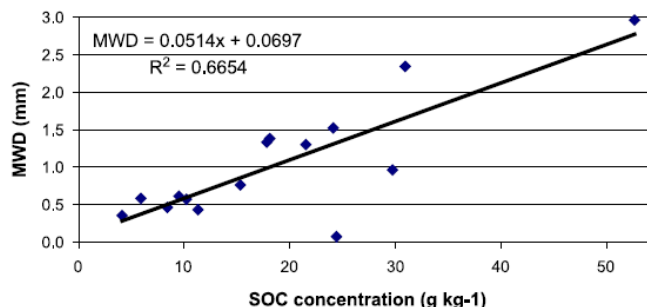


Figure 1. Relation entre le carbone organique du sol (SOC) et un indicateur de la stabilité structurale (MWD²) à partir des données de Chenu et al. (2000) (Bronnick et Lal, 2005)

² Développé dans le chapitre IV

Le rôle stabilisant de la matière organique est complexe et lié à la combinaison de plusieurs processus qui peuvent ou non avoir lieu simultanément et qui se mettent en place avec des échelles de temps variables. Les principaux processus sont les suivants (Amezetka, 1999; Bronick et Lal, 2005; Chenu et Cosentino, 2011):

- La matière organique particulaire associée aux cations polyvalents ou aux argiles constitue un noyau autour duquel des macro-agrégats vont se former. C'est particulièrement vrai dans les sols non labourés (Six et al., 1999).
- Différents agents organiques qui sont soit, transitoires (les polysaccharides), temporaires (les hyphes mycéliens) ou persistants (les substances organiques aromatiques, polysaccharides intégrés dans des composés humiques plus stables) assurent une cohésion inter-particulaire (Amezetka, 1999). Les polysaccharides sont fortement adsorbés sur les surfaces minérales agissant comme des ponts entre particules (Martens, 2000) ou comme un gel collant les particules entre elles au sein des agrégats (Haynes et Beare, 1997). Les micro-organismes eux-mêmes ont la capacité d'adhérer aux particules solides, organiques ou minérales. Les hyphes mycéliens créent un maillage autour des agrégats les plus petits pour former des agrégats plus larges et stables (Oades and Water, 1991). Les molécules phénoliques issues de certains résidus de cultures complexent des cations pour former des ponts cationiques. Elles sont aussi des précurseurs de molécules humiques. Ces molécules humiques récalcitrantes sont adsorbées sur les argiles par le biais de cations polyvalents, évitant ainsi le risque de dispersion des argiles liée par exemple à des cycles de dessiccation-humectation.
- Le réseau poral du sol peut varier en fonction des matières organiques et de l'activité microbienne associée, du fait (i) de la capacité de gonflement –retrait contrastée vis-à-vis des zones sans activité microbienne et des polysaccharides d'origine microbienne (Chenu, 1993) et (ii) du colmatage des pores par les sucres issus de l'activité microbienne et (iii) de l'augmentation de la rugosité de la surface des pores par ces mêmes sucres ainsi que les lipides produits lors de la décomposition de certaines matières organiques (Zaher et al., 2005).
- La formation d'un film hydrophobe induit une diminution de la mouillabilité de l'agrégat et donc de la vitesse de pénétration de l'eau et de ce fait une résistance à l'éclatement (Caron et al., 1996; Chenu et al., 2000). Les molécules concernées sont certaines protéines, des lipides sécrétés par respectivement des champignons mycorhiziens et des bactéries (Bronick et Lal, 2005; Rillig et al., 2010; Chenu et Consantino, 2011) mais aussi de polysaccharides à l'origine hydrophiles qui peuvent subir une altération physique sous l'action de la température et de la sécheresse leur conférant une propriété répulsive (Czarnes et al., 2000).

La contribution effective de ces processus d'agrégation et de stabilisation n'est pas toujours évidente à montrer, sûrement du fait d'interactions qui s'opèrent entre eux, et est souvent étudiée par des approches corrélatives. La formation de ces agents dans le temps dépend de la qualité des matières organiques apportées au sol. Cette qualité est décrite par le rapport C/N et/ou les caractéristiques biochimiques des produits qui déterminent leur biodégradabilité par les

micro-organismes du sol. Cela revient à mesurer différents compartiments biochimiques aux vitesses de décomposition différentes dans le sol.

Monnier (1965) a proposé un schéma conceptuel qui met en parallèle les évolutions de stabilité des agrégats avec l'activité des microorganismes induites par la décomposition de ces matières organiques (figure 2). Des matières organiques facilement dégradables (engrais vert) induisent une augmentation conjointe et importante de la stabilité structurale. Une paille de blé présentant une décomposition plus ménagée dans le temps aura un effet moins marqué mais plus pérenne. Un fumier évolué stable aura un effet sur le long terme. L'activité biologique du sol, à l'origine de la production des agents cités ci-dessus constitue l'élément clé de l'amélioration de la stabilité structurale à toutes les échelles de temps. Quelques études (Schlecht-Pietsch et al., 1994; Hadas et al., 1994, Kiem et Kandeler, 1997) ont permis de mettre en évidence ce rôle clé au cours de la dynamique de décomposition de différents produits organiques sans prendre en compte, pour la plupart, le lien avec les caractéristiques biochimiques des produits étudiés. Martens (2000) a distingué l'effet rapide de résidus de cultures riches en polysaccharides de l'effet plus tardif de résidus de cultures riches en phénols au cours d'une incubation. Souvent, seul un facteur agrégeant était étudié (principalement les polysaccharides).

In situ, ces processus de formation, stabilisation que nous venons de décrire peuvent avoir lieu en même temps que des processus de destruction des agrégats. Ces derniers peuvent être reliés à l'action du climat (pluie), d'un engin agricole mais aussi liée à la consommation par les micro-organismes du sol des produits ayant permis l'agrégation et la stabilisation (Chenu et Cosentino, 2011). Il est donc difficile de les dissocier. C'est pourquoi nous avons, dans un premier temps privilégié une approche basée sur le suivi de la stabilisation d'agrégats pré-calibrés en conditions contrôlées de laboratoire.

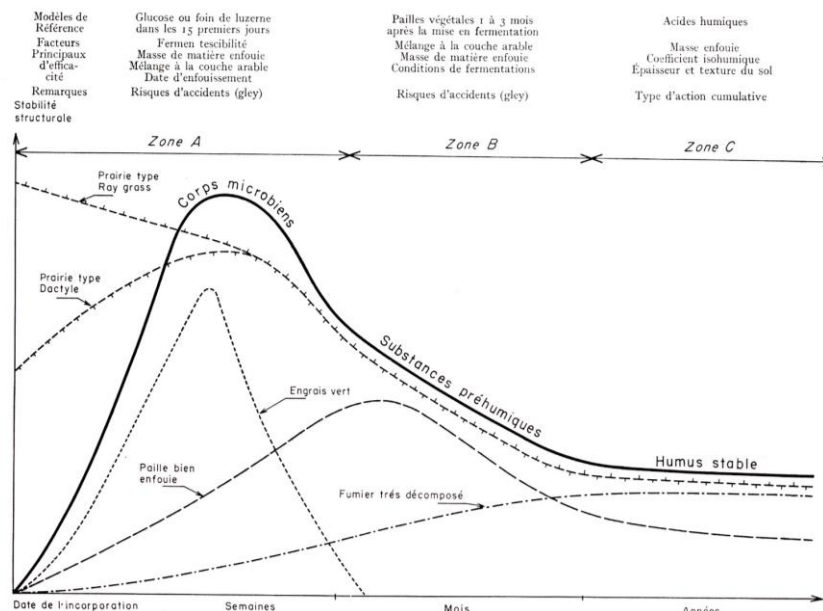


Figure 2. Présentation schématique des différents types de stabilisation par les matières organiques (Monnier, 1965)

II.2. Les facteurs de contrôle biotiques et abiotiques

II.2.1. Les facteurs de contrôle biotiques

Parmi les facteurs biotiques qui vont largement influencer ces processus (Bronick et Lal, 2005), les plantes dont les racines sont des facteurs agrégants directs et indirects très importants, la macrofaune, les micro-organismes du sol.

Les plantes ont un effet sur la stabilité structurale qui dépend des espèces, du type de résidus de cultures qui va retourner au sol, des types d'exsudats racinaires qui vont être émis, des cortèges de macro et micro-organismes qui leur sont associés (Jastrow et al., 1998). Les racines, par la pression qu'elles exercent en se développant ainsi que par la modification de l'état hydrique du sol, sont des agents de la formation et la dégradation des agrégats (Kay, 1990 cité par Jastrow et al., 1998). De ce fait, la densité et l'architecture du système racinaire peut influencer les distributions des tailles des agrégats (Miller et Jastrow, 1990, cités par Jastrow et al., 1998). Amezteka et al. (1999) montre dans sa revue que les résultats peuvent être contradictoires mais, que d'une manière générale, la stabilité structurale sous prairie et couvert permanent est supérieure à celle sous cultures annuelles en rotation, elle-même supérieure à celle sous monoculture (Angers et Caron, 1998).

La macrofaune du sol, et principalement la communauté lombricienne du sol, est sensible au travail du sol (Chan, 2001; Kladivko, 2001 ; Estrade et al., 2010) et aux apports d'amendements organiques (Cluzeau et al., 1999). Elle participe à la formation des agrégats en ingérant des matières organiques particulaires et en produisant des turricules enrichis en matières organiques et en argiles (Shipitalo and Protz, 1988; Marinissen and Dexter, 1990) formant ainsi des agrégats stables (Fonte et al., 2007) et indirectement en stimulant les microorganismes du sol qui sécrètent à leur tour des polysaccharides extracellulaires (Zhang et Schrader, 1993) ou augmentent l'hydrophobicité des agrégats (Jouquet et al., 2008).

Le rôle des communautés microbiennes dans les processus d'agrégation a rapidement été mis en évidence. Les bactéries jouent un rôle essentiel dans la production de polysaccharides alors que les champignons, dont le poids est plus important, jouent plusieurs rôles dans ces processus : la production de polysaccharides extracellulaires, la production de molécules hydrophobes, la production d'hyphes mycéliens qui constituent un maillage autour des agrégats. Il a été montré que des conditions d'azote limitant favorisaient les communautés fongiques, en particuliers en cas d'incorporation de résidus de culture à C/N élevé (Lavelle, 2002; de Vries et al, 2006 ds Chenu et Cosentino 2011) sans que les conséquences sur l'agrégation n'aient été étudiées (Chenu et Cosentino, 2011). Ce rôle a pourtant été identifié très tôt (Martin and Whaksman, 1940; Six et al. 2004) et les processus qu'il sous-tend bien identifiés mais le lien avec les pratiques agricoles a été mis en évidence plus récemment. Les mécanismes par lesquels les bactéries et les champignons influencent l'agrégation dépendent de la texture du sol. La dynamique de ces populations est influencée par les apports de produits organiques en particulier, par les modes d'occupation et de gestion des parcelles, en général: types de cultures, modalités de travail du sol, gestion organique des parcelles (Frey et al., 1999, Butenshoen et al., 2007), fertilisation azotée, et les conditions climatiques (Denef, 2001 ; Calbrix et al., 2007). La décomposition des matières

organiques apportées (MOA) au sol stimule des communautés microbiennes spécifiques en fonction de l'affinité des microorganismes aux molécules qui composent ces MOA. Les bactéries présentent une affinité avec les substrats carbonés labiles alors que les champignons se développent sur des substrats dominés par des molécules récalcitrantes. Ce rôle des microorganismes dans la formation d'agrégats stables a été déterminé par de nombreuses approches, en microscopie électronique (Chenu, 1989; Degens et al., 1996) ou par des approches corrélatives entre indicateurs microbiens quantitatifs (p.ex. biomasse microbienne totale) et la stabilité des agrégats (Roldan et al., 1996; Chantigny et al., 1997; Cosentino et al., 2006; Annabi et al., 2007). Ces approches corrélatives entre biomasses microbiennes et la stabilité des agrégats sont celles que l'on retrouve majoritairement ces dernières années dans l'étude du processus d'agrégation.

La mise en œuvre de techniques d'empreintes génétiques, dans le cadre d'études de la diversité des populations microbiennes en réponse aux types de sol et à leur statut organique ont été développées ces dernières années (Lejon et al., 2007a et 2007b ; Nicolardot et al., 2007). De tels résultats permettent d'envisager l'utilisation de ces techniques pour clarifier, à partir de l'analyse de la structure des communautés microbiennes, leur rôle dans les processus de formation et de stabilisation des agrégats.

II.2.2. Les facteurs de contrôle abiotiques

Parmi les facteurs abiotiques, nous pouvons citer le type de sol (texture, type d'argiles, pH), le climat caractérisé par (i) les cycles d'alternance gel-dégel, dessèchement-hydratation qui peuvent entraîner la destruction des agrégats ou au contraire favoriser certains processus d'agrégation plutôt que d'autres, mais aussi la durée des périodes d'engorgement des sols en eau ou des périodes sèches avant le prélèvement (Diaz Zorita et al., 2002) (ii) des conditions de milieu (température, humidité et la disponibilité en azote minéral du sol) qui modulent la décomposition des matières organiques apportées (Abiven et al., 2008).

Les effets des différents facteurs sur la stabilité structurale varient avec le temps (Yang et Wander, 1998).

II.3. Les méthodes de quantification des processus de formation et stabilisation des agrégats

Les méthodes de mesures de la stabilité structurale sont nombreuses et basées sur des contraintes appliquées aux agrégats différentes. Le principe reste cependant le même : une contrainte est appliquée à des agrégats et le résultat de la désagrégation est quantifié sous forme de distribution de tailles d'agrégats. Les agrégats inférieurs à 250 μm sont les microagrégats et ceux supérieurs à 250 μm , les macroagrégats. Le nombre de tailles d'agrégats considérées est variable et la préparation des agrégats (premier tamisage, agrégats frais, séchés à température ambiante puis ré humectés ou non) également. Certaines méthodes sont basées sur la résistance des agrégats à l'action de gouttes d'eau, l'immersion et l'agitation dans l'eau (Martin et Waksman, 1940; Skinner, 1979), le tamisage dans l'eau (Yoder, 1936 ; Kemper et Roseneau, 1986 ; Elliott et al., 1986 ; Angers et al., 2008), ou dans différents liquides (Hénin et al., 1958 ; Le Bissonnais, 1996) avec différentes énergies appliquées (Kinsbursky et al., 1989), selon des mouvements hélicoïdaux (Hénin, 1958) ou verticaux (Yoder, 1936). Différentes revues font état de cette

diversité (Le Bissonnais, 1996a; Amezetka, 1999; Diaz-Zorita et al., 2002). L'adoption de l'une ou l'autre des méthodes et son adaptation par les différentes équipes de recherches dépendent (i) de l'objectif de l'étude orienté vers l'étude du risque érosif (éolien ou hydrique) ou de l'agrégation, la fertilité des sols, la séquestration du carbone, (ii) du processus de désagrégation privilégié (dispersion, éclatement, ...) et (iii) du type de sol stable ou instable. De ce fait, l'influence de la méthode mise en œuvre sur le résultat reste difficile à cerner. Ce qui complique la possibilité de synthèse et d'extrapolation de l'ensemble des résultats obtenus dans la littérature. Les résultats sont exprimés sous forme de diamètre moyen pondéré exprimé en mm, de pourcentage d'agrégats stables à l'eau, de répartition de tailles d'agrégats.

III. Objectifs de la recherche menée de 2000 à 2014

Les objectifs de recherche sont déclinés selon l'échelle temporelle d'approche. La présentation des résultats suivra cette structuration. La figure 3 résume l'ensemble des facteurs et processus étudiés pour répondre aux objectifs de recherche. Dans mon approche de recherche, j'effectue des allers retours entre (i) la compréhension des processus au cours d'expérimentations menées en conditions contrôlées de laboratoire et in situ dans des essais agronomiques, (ii) le développement de démarche de modélisation et (iii) l'observation dans des réseaux de parcelles d'agriculteurs. La problématique étant très vaste, les travaux de recherche que j'ai menés dans le cadre de 2 programmes de recherche (MO-STAB, MO-TCS), de l'encadrement ou Co-encadrement de 3 thèses et de stages de Master 2, et grâce à des collaborations avec le LUBEM (Brest), UMR Ecobio (Rennes), BiomCo (Paris), EGC (Grignon), Agroécologie (Dijon), et AAC Québec (Canada) ont particulièrement porté sur:

(1) Etude de l'effet d'un produit organique sur le court terme : Le court terme correspond au cycle d'une culture au cours duquel (i) la disponibilité des nutriments, les échanges gazeux, la circulation et la rétention de l'eau sont autant de facteurs de croissance influençant directement le développement de la culture (Desbosz et al., 2002) et (ii) le sol peut se trouver insuffisamment couvert par la culture et donc soumis aux risques de battance et d'érosion. Il s'agit donc d'étudier le potentiel de stabilisation de la structure du sol par les matières organiques restituées au sol selon des approches expérimentales plus ou moins exhaustives décrites dans la figure 3.

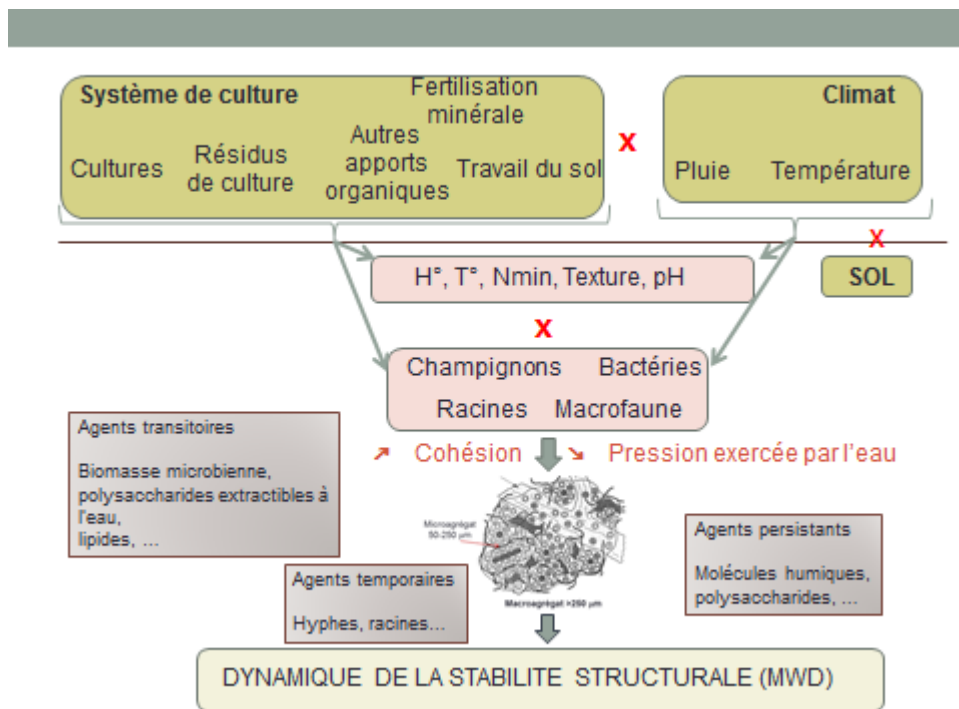


Figure 3. Récapitulatif des facteurs de stabilisation de la structure du sol (inspiré de Tisdall & Oades, 1982 ; Jastrow et Miller, 1998; Chenu et Cosentino, 2011) et des variables influençant ces facteurs – Les agents de la formation et stabilisation des agrégats contribuent à deux grands types de processus: ceux qui permettent une meilleure cohésion entre particules et ceux qui permettent de diminuer la contrainte exercée par l'eau sur les agrégats (hydrophobicité et modification de l'espace poral).

Cette étude qui a été focalisée sur les processus de stabilisation générés par la décomposition de produits organiques, a comporté 3 volets :

- Mise en évidence de l'importance des caractéristiques biochimiques des produits et effet sur la dynamique de la stabilité structurale dans le temps afin de préciser la durabilité de cet effet [Thèse de Samuel Abiven, Programme GESSOL MO-STAB]
- Mise en évidence de l'importance de la diversité des microorganismes du sol, générée par la décomposition de ces produits, à l'origine de la dynamique de la stabilité structurale du sol [Master2 et thèse de Cédric Le Guillou]
- Etude, in situ, de la modulation des effets des matières organiques par le climat (qui modifie notamment les teneurs en eau du sol) [thèses de Samuel Abiven et de Cédric Le Guillou] et par le développement d'une culture [projet mené en autonomie suite à la thèse de Samuel Abiven]

(2) Modélisation sur la base des données acquises dans (1). Deux types de modélisation ont été proposés :

- Le modèle « Pouloud » basé sur une relation mathématique ajustée statistiquement aux données expérimentales, proposé par Samuel Abiven dans le cadre de sa thèse, mettant en œuvre des informations accessibles aux professionnels, que l'on cherche, aujourd'hui, à valider et généraliser à un grand nombre de produits organiques, dans le cadre de la thèse de Jérémy Dénès, avant de procéder à une généralisation à un grand nombre de types de sols différents.

- Un modèle conceptuel à partir des travaux conduits dans le cadre de la thèse de **Cédric Le Guillou** soulignant l'importance de la diversité microbienne dans la dynamique de la stabilité structurale. La démarche de modélisation, cette fois mécaniste, est aujourd'hui prise en charge par **Benjamin Louis**. La prise en compte des effets conjoints de l'ensemble de pratiques culturales appliquées et de leurs interactions avec les facteurs naturels (climat, type de sol, régime hydrique) sur la dynamique des matières organiques (MOS) et des propriétés associées (dont la stabilité structurale), s'avère essentielle pour optimiser la gestion des MOS. La nature et l'importance de ces interactions résultent de la réponse des communautés microbiennes (bactéries, champignons) au changement si bien que l'enjeu est d'intégrer aux modèles la dimension microbienne des sols. La thèse ayant débuté il y a un an, cet aspect sera développé dans la partie « Perspectives ».

(3) Etude, sur le moyen terme, de l'effet combiné d'apports de produits organiques et de différentes modalités de travail du sol [Thèse de Nicolas Bottinelli]

Les apports d'effluents d'élevage peuvent être de plus en plus combinés à des techniques sans labour, particulièrement en Bretagne. Partant de l'hypothèse que l'effet de la combinaison de ces pratiques sur la quantité et qualité des matières organiques du sol et des propriétés associées reste encore mal connu, nous avons mené une étude visant à clarifier les facteurs dominants de l'évolution de la stabilité structurale des sols et les mécanismes mis en jeu lorsque les pratiques de travail du sol et de fertilisation sont modifiées. C'est ce que nous avons fait à deux échelles de temps : pluri-annuelle et saisonnière.

(4) Rôle de l'historique des parcelles cultivées sous des systèmes de cultures contrastés dans la variabilité des niveaux de stabilité structurale des sols cultivés.

Ce travail a été réalisé à partir de données acquises sur un réseau de parcelles cultivées lors du travail réalisé dans le cadre de l'observatoire « Lisier » et lors du stage M2 de Céline Pacault. Les essais que nous menons sont souvent mono ou bi-factoriels. Or, la réalité est bien plus complexe. L'objectif était d'identifier la composante de ces systèmes de culture (cultures dans la succession, effluents) impactant le plus le niveau de stabilité structurale du sol à l'échelle d'une région. J'ai directement pris en charge cet aspect de mon projet de recherches, plus prospectif, qui a nécessité un travail de rassemblement et d'homogénéisation de l'information que j'ai pu réaliser lors de ma mise en délégation.

IV. Approche méthodologique commune à toutes les activités de recherche dont les résultats sont présentés

La démarche méthodologique adoptée pour répondre aux objectifs de recherche exposés ci-dessus, a été basée sur la réalisation, plus ou moins exhaustive, des analyses suivantes :

- **Stabilités structurales** (figure 4) selon la méthode développée par Le Bissonnais (1996): Les sols sont séchés à température ambiante, délicatement émiétés et tamisés afin d'obtenir des agrégats calibrés entre 3 et 5 mm. Ces agrégats sont séchés à 40°C pendant 24h, afin d'éviter des différences de résultats liés à l'humidité du sol. Trois traitements, simulant différents mécanismes de désagrégation sous différentes combinaisons de régimes de pluies et d'état du sol en surface (humide ou sec), sont appliqués aux agrégats : l'humectation rapide qui entraîne une désagrégation par piégeage de l'air et éclatement, l'humectation lente qui entraîne une

désagrégation par gonflement différentiel des argiles, l'agitation mécanique des agrégats pré humectés dans l'éthanol qui mesure la cohésion inter-particulaire indépendamment de l'éclatement et du gonflement différentiel. Les agrégats ayant subi ces traitements sont transférés dans un tamis de 50 µm qui subit des mouvements hélicoïdaux (Hénin et al, 1958). Le résultat de la désagrégation est ensuite séché pendant 24h à 40°C puis transféré sur une colonne de tamis allant de 50µm à 2mm. Le diamètre moyen pondéré ou mean weight diameter (DPM ou MWD) est calculé pour chacun des traitements.

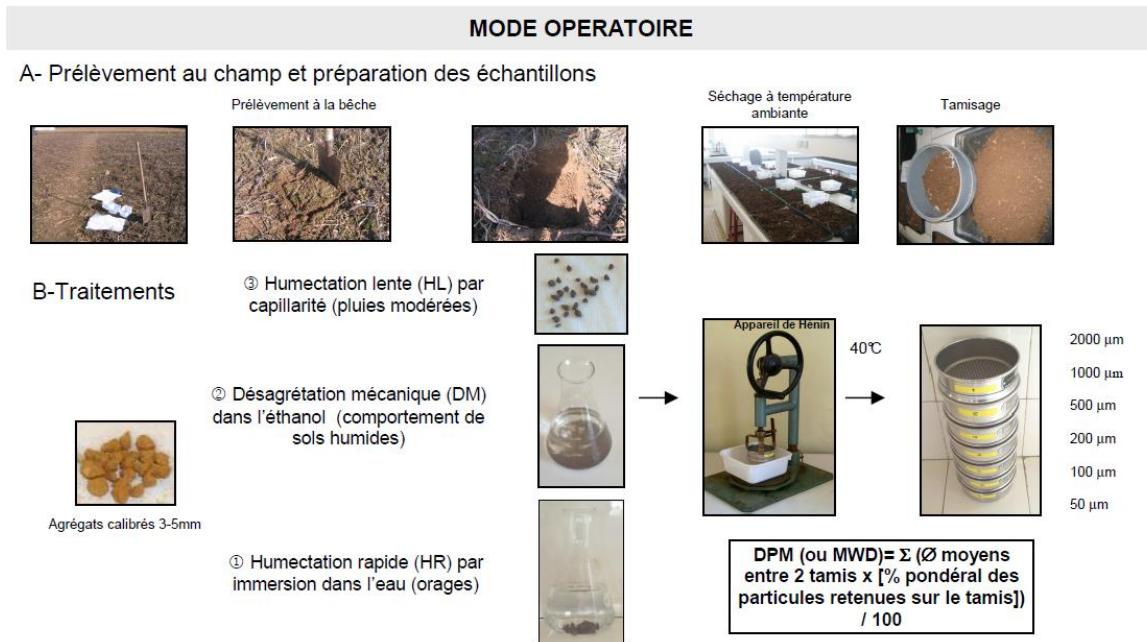


Figure 4. Protocole de mesure de la stabilité structurale (Busnot et al., 2012, poster présenté aux J2M)

Le protocole a été mis en place dans notre laboratoire grâce à une formation réalisée à l'UR de Sciences du Sol de l'INRA d'Orléans et a fait l'objet d'un travail d'inter-calibration conduit par Yves Le Bissonnais dans le cadre du programme MO-STAB.

Comme cela a été le cas dans les travaux menés par Chenu et al. (2000) et Le Bissonnais et al. (2002), il est rapidement apparu lors des premiers travaux de recherches, que le traitement à l'humectation lente (hl ou sw pour slow wetting) était celui qui révélait une dynamique d'évolution de la stabilité des agrégats la plus en lien avec la dynamique des matières organiques, en partie du fait de son caractère peu agressif, adapté à nos sols limoneux fragiles. Bien que les autres traitements aient été étudiés, les résultats présentés concerneront exclusivement le traitement à l'humectation lente, par soucis de clarté. Ces résultats seront exprimés sous forme de MWD sw ou hl (mm).

Dans le cadre de la thèse de Cédric Le Guillou, nous avons souhaité étendre nos recherches à des problématiques autres que le strict risque érosif ou de formation d'une croûte de battance. Ainsi, nous nous sommes intéressés au processus de formation et de stabilisation des agrégats. Pour cela nous avons travaillé sur l'ensemble de la fraction 0-5mm (sans calibrer les agrégats entre 3-5mm), et adapté un protocole proposé par Angers et al (2008) qui consiste à

mesurer directement la désagrégation dans l'eau d'agrégats pré-humectés (afin d'éviter l'éclatement) sur une colonne de tamis (2, 1 et 0.5 mm).

- **Agents et facteurs de contrôle de la stabilisation :**

Caractérisation des micro-organismes du sol : Biomasse microbienne globale par fumigation-extraction (Vance et al., 1987), ergostérol (Djajakirana et al., 1996 ; Gong et al., 2001), sucres aminés (Chantigny et Angers 2008), diversité microbienne à partir d'une extraction de l'ADN (Ranjard et al., 2003) et de détermination d'une structure génétique par ARISA.

Caractérisation des processus induits: cohésion: sucres extractibles à l'eau chaude (80°C) représentatifs des mucilages racinaires et microbiens (Puget et al., 1999), hyphes mycéliens par extraction puis analyse d'image (Frey et al., 1999), hydrophobicité en mesurant le temps de pénétration d'une goutte d'eau WDPT (s) dans les agrégats (Letey, 1969).

- **Caractérisation des matières organiques** apportées par l'établissement du rapport C/N ainsi que l'application de la méthode de fractionnement biochimique successif Van Soest (AFNOR, 2009) aboutissant à des extractions successives des fractions soluble (à l'eau et soluble au détergent neutre), équivalente à l'hemicellulose, équivalente à la cellulose, équivalente à la lignine, de la matière organique.

- **Minéralisation de l'azote et du carbone** au cours d'incubations de sols et de mélanges en conditions contrôlées de laboratoire ($T^{\circ}=25^{\circ}\text{C}$ et H° au potentiel de -50 ou -60 KPa) dans des bocaux, selon des approches classiques de suivi du CO_2 piégé dans 20 ml de soude (0.1 M) puis titration avec de l'HCl (1M) après ajout d'une solution de BaCl_2 (30 %) et d'extraction de l'azote minéral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) dans une solution de KCl (1M). Toutes les incubations ont fait l'objet d'une pré-incubation d'une semaine du sol, avant l'apport du produit organique, dans les mêmes conditions de température et d'humidité que l'incubation. Les sols sont tamisés entre 3 et 5 mm, séchés à température ambiante, puis ré-humectés.

V. Synthèse des principaux résultats de recherche

Je suis arrivée à l'UMR SAS en 2000, à un moment où les professionnels questionnaient les scientifiques de l'UMR sur la valeur amendante des produits organiques et donc sur les relations entre dynamique des matières organiques dans le sol et propriétés physiques du sol. C'est alors que l'on m'a confiée la mission de développer des recherches dans ce domaine. C'est grâce à l'esprit d'initiative de Céline Rouan (en stage M2), puis de Samuel Abiven, en thèse de Doctorat, relayés par l'équipe d'encadrement, que les méthodes citées ci-dessus ont été progressivement mises en place dans l'UMR. Certaines ont nécessité le recours à des compétences extérieures au laboratoire (dosage de l'ergostérol, des sucres aminés, de la diversité microbienne des sols) mobilisées dans le cadre de collaborations avec les UMR EGC, BiomCo, Ecobio et Agroécologie et AAC Québec³.

V.1. Etude du potentiel de stabilisation de la structure du sol par les matières organiques restituées au sol

Ce travail a été initié en réponse à une sollicitation des professionnels légumiers visant à définir des stratégies de gestion des matières organiques qui puissent satisfaire aux contraintes de structure du sol. Le constat d'une dégradation progressive de la qualité physique des sols légumiers nécessitait de disposer d'une aide au raisonnement du choix des produits organiques auquel les producteurs de légumes devaient faire face par la caractérisation de leurs effets sur les propriétés physiques des sol en général, de la stabilité structurale en particuliers. La thèse de Samuel Abiven a permis de poser un cadre de référence agronomique à l'utilisation des divers produits organiques proposés aux agriculteurs. Ce cadre a donc été repris lors de la thèse de Cédric Le Guillou puis, de Jérémie Dénès.

Ce potentiel de stabilisation de la structure du sol a été mesuré en conditions optimales, vis-à-vis de la décomposition des produits, et contrôlées de laboratoire et, au champ sous un sol nu puis sous culture. Dans tous les cas (laboratoire ou in situ), la dose apportée des produits a toujours été calculée de manière à apporter 4 g de carbone par kg de sol sec. Les produits ont été séchés à 60°C puis finement hachés (broyeur à couteaux) à moins de 1mm pour les incubations.

Tableau 1. Caractéristiques des sols des essais mobilisés.

Dénomination	Nom du dispositif expérimental	% C	pH	% A	% L	%S	MWD sw témoin (mm)
SOL 1	Rimbaudais ⁽¹⁾	1.08	7.7	9.5	51.8	38.7	0.55
SOL 2	Kerguehenec ⁽²⁾	2.5	5.2	16	42	42	1.14
SOL 3	Champ Noël ⁽³⁾	0.97	6.2	15.1	71.1	13.8	0.51
SOL 4	Efele ⁽⁴⁾	1.19	6.1	14.6	69.3	16.1	0.47

⁽¹⁾Site expérimental du Cotig (35); ⁽²⁾ Site expérimental de Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (56), ⁽³⁾ Site expérimental INRA, UMR SAS (35); ⁽⁴⁾ Site expérimental « EFELE », UMR SAS, SOERE PRO (35).

³ UMR EGC (Environnement et Grandes Cultures, Grignon), BiomCo (Biogéochimie et écologie des milieux continentaux, Paris), Ecobio (Ecosystèmes, biodiversité, évolution, Rennes), Agroécologie (Dijon), AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

Les études ont été menées sur des sols limoneux respectivement issus de systèmes de cultures légumiers (SOL 1) et fourragers (SOL 2, SOL 3, SOL 4) présentant les caractéristiques décrites dans le tableau 1. Ils diffèrent par leur niveau de matière organique dans le sol.

V.1.1. Mise en évidence des processus de stabilisation et importance des caractéristiques biochimiques

Thèse de Samuel Abiven (Co-encadrement avec Philippe Leterme, Directeur de la thèse)

Collaborations : Claire Chenu (UMR BiomCo) & Denis A. Angers (AAC) (Publications 12, 13 et 14)

Programme de recherche : Gessol MO-STAB

L'objectif de recherches était de déterminer quelles étaient les propriétés initiales intrinsèques de la matière organique apportée à l'origine de l'évolution de la stabilité structurale dans le temps, après l'apport d'un produit organique dans le sol, via l'évolution des facteurs agrégeants d'origine biologique dans le sol avec pour hypothèse forte que l'effet de l'apport de produits organiques sur la stabilité structurale est d'autant plus important que les propriétés initiales du produit favorisent l'activité biologique.

V.1.1.1. Synthèse bibliographique

Une exploration exhaustive de résultats publiés (48 publications considérées) couvrant une grande variété de produits organiques (Abiven et al., 2009, Fig. 5), a pu montrer que malgré les différentes méthodes de mesure de la stabilité structurale utilisées, ces résultats appuient le schéma de Monnier selon lequel les produits organiques labiles (fraction soluble importante) ont un effet important sur la stabilité structurale, en général fugace. C'est le cas des mucilages, des refus urbains. D'autres, au contraire, ont un effet peu marqué mais sur le long terme. Ce sont les produits stables riches en lignines (tourbes, composts). Les pailles de blé, les exsudats, sont intermédiaires. Ce qui confirme le rôle important de l'activité de décomposition dans la promotion de la stabilité structurale **sur le court terme**.

Les caractéristiques biochimiques intrinsèques des produits constituent le facteur majeur qui gouverne leur biodégradabilité et donc leur effet sur la dynamique de la stabilité structurale. Pour autant, peu d'auteurs ont mis en relation l'effet de ces produits sur la stabilité structurale et leurs caractéristiques biochimiques. Martens et Frankenberger (1992) et Sonnleitner et al., (2013) ont tenté, sans succès, une relation entre le rapport C/N et la stabilité structurale ou l'agrégation. Martens (2000, 2002) a trouvé une corrélation significative avec la teneur en protéines ou les acides phénoliques de résidus de cultures.

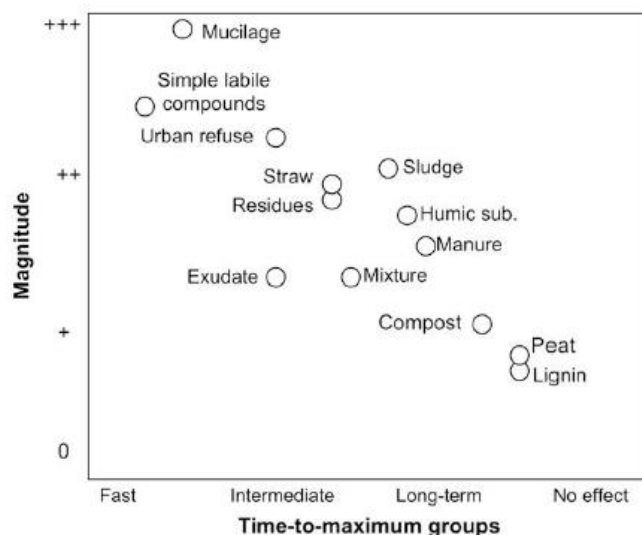


Figure 5. Présentation schématique des relations entre l'amplitude relative de l'effet des produits sur la stabilité structurale et l'échelle de temps caractéristique de cet effet. Le temps pour atteindre l'effet maximal a été réparti en 4 classes : rapide (l'effet maximal est atteint en un mois), intermédiaire (effet maximal atteint entre un et 3 mois), sur le long terme (effet maximal atteint après 3 mois), pas d'effet. L'amplitude (magnitude) est le ratio entre la stabilité structurale mesurée dans le sol+produit et celle mesurée dans le sol témoin : 0 : pas d'effet (ratio ≤ 1), + : faible ($1 \leq \text{ratio} \leq 1.3$), ++ : fort ($1.3 \leq \text{ratio} \leq 2$), +++ : très fort (ratio > 2) (Abiven et al., 2009).

Les résultats peuvent diverger du fait de la méthode de mesure de la stabilité structurale utilisée, du type de sol considéré, des conditions expérimentales (durée de l'incubation, fréquence de la mesure, l'apport ou non d'azote minéral).

V.1.1.2. Dynamique de la stabilité structurale au cours de la décomposition des produits organiques : approche expérimentale

Pour répondre à l'objectif de la thèse, nous avons, étudié l'effet sur la stabilité structurale de différents produits organiques pouvant retourner au sol dans le cadre des systèmes de cultures légumiers et présentant des caractéristiques biochimiques contrastées (Abiven et al., 2007): des résidus de culture de chou-fleur à faible contribution humique, des pailles de blé (cette culture étant recommandée pour diversifier les rotations légumières et augmenter la contribution humique des résidus de cultures), un fumier de bovins (produit organique de référence) et un compost de fumier de volailles (tableau 2), en conditions contrôlées de laboratoire. Ainsi, en nous référant à la figure 5, nous avons, à priori, les résidus de cultures caractérisés par un temps intermédiaire et une amplitude de l'effet forte sur la stabilité structurale, le fumier de bovins caractérisé par un temps long et une amplitude intermédiaire entre faible et forte et un compost caractérisé par un temps long et une amplitude faible. Le sol considéré est le sol 1 du tableau 1. Le C/N de la paille étant élevé, un apport d'azote a été réalisé afin que cet élément ne soit pas limitant au cours de cette expérimentation.

Tableau 2. Caractéristiques biochimiques initiales des produits organiques étudiés

Produit organique	Total C	Total N	C/N	Soluble-NDF	Eq-Hemicellulose	Eq-Cellulose	Eq-Lignine
	g.kg ⁻¹ sol sec						
Résidus de Chou-Fleur	462	36.2	12.8	615	152	154	78
Paille de blé	490	3.6	136.1	173	326	437	64
Fumier de bovins	435	23.7	18.4	487	204	182	127
Compost d'écorces de peuplier*	372	22	16.8	415	126	261	198

* et fientes de volailles

Seule la dynamique de la stabilité structurale mesurée après traitement après humectation lente est reliée à la biodégradabilité des produits étudiés (Fig. 6). En effet, on retrouve bien un effet important des résidus de cultures pendant les 20 premiers jours de décomposition active des produits. L'effet du compost qui a peu minéralisé n'est pas significatif alors que celui du fumier de bovins est intermédiaire.

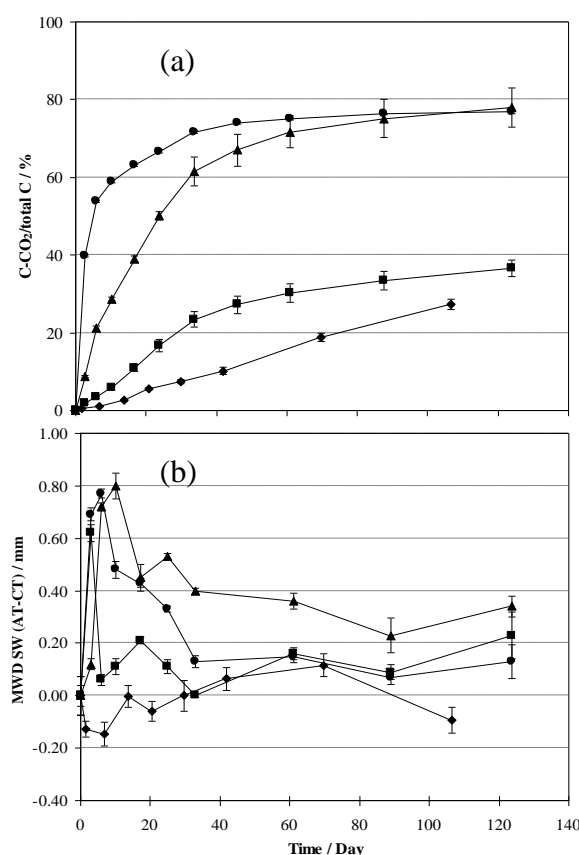


Figure 6. Minéralisation cumulée du carbone (a) exprimée en pourcentage du carbone apporté pour chacun des produits et dynamique de stabilité structurale (MWD sw) exprimée en différence au témoin. Résidus de chou fleur (ronds), la paille de blé (triangles), le fumier de bovins (carrés) et le compost (losanges). Les barres représentent l'erreur standard (n=3) (Abiven et al., 2007)

Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature qui mettent en relation la biodégradabilité des produits et leur effet sur la dynamique de la stabilité structurale (Martin, 1945b ; Monnier, 1965 ; Tisdall et Oades, 1982 ; Vandevivere, 1990). Leroy et al (2008) ont montré également un effet plus important sur la stabilité structurale d'un apport de fumier comparé à celui d'un compost. Zaher et al (2005) ont également mis en évidence qu'un compost caractérisé par une minéralisation plus faible que le produit brut (une boue de papeterie) a eu un effet plus faible sur la stabilité structurale que le produit brut. Ce faible effet lié aux apports de composts dépend de la durée du compostage. Annabi et al (2007) a comparé les effets de composts immatures avec ceux de composts matures. Ces derniers, présentant une biodégradabilité moindre que les premiers, ont eu un effet non significatif sur la stabilité structurale alors que les composts immatures ont eu un effet significatif sur la dynamique de la stabilité structurale notamment en début d'incubation.

La dynamique de stabilité structurale (MWD sw ou hl) a été trouvée significativement corrélée aux polysaccharides extraits à l'eau chaude pour les résidus de chou-fleur ($r=0.95$, $P\leq 0.05$) et la paille de blé ($r=0.87$, $P\leq 0.05$), ces derniers étant eux-mêmes significativement corrélés aux taux de minéralisation du carbone ($\%C-CO_2,j^{-1}$) ($r= 0.73$ et $r=0.87$, $P\leq 0.05$ respectivement pour ces deux traitements). Ce qui suggère bien que ces polysaccharides sont d'origine microbienne (Puget, 1999). Toutefois, cette relation mise en évidence lors de la décomposition de résidus de culture est moins vraie lors de la décomposition de fumier ou de compost. La nature des sucres produits par la biomasse microbienne et leur efficacité dépendrait du type de produit incorporé au sol. Une seconde hypothèse serait que l'efficacité de ces sucres dépendrait de leur localisation dans l'agrégat ou entre les agrégats (Abiven et al., 2007).

Aucune corrélation n'a été trouvée entre le développement des hyphes mycéliens, surtout observé dans les traitements paille de blé et fumier de bovins, et la dynamique de la stabilité structurale mesurée après l'humectation lente.

V.1.1.3. Développement du modèle Pouloud

Il existe peu de modèles de prédiction de la dynamique de la stabilité structurale suite à un apport de produit organique. De Gryze et al (2005) ont proposé un modèle décrivant le turnover des agrégats (formation, stabilisation, destruction) après l'incorporation d'une paille de blé dans des sols de textures différentes. Malamoud et al. (2009) ont également proposé un modèle d'évolution des agrégats suite à des apports organiques, intégrant le modèle de dynamique du carbone Roth-C (Coleman et al., 1997), et visant à réaliser des simulations sur le long terme. Segoli et al. (2013) plus récemment ont développé un modèle mécaniste de formation et stabilisation des agrégats suite à des apports organiques considérant une caractérisation de la matière organique basée sur le fractionnement physique. Ces travaux ont le mérite de s'approcher de la réalité au champ, mais ils ne font pas le lien avec les caractéristiques biochimiques de différents produits organiques.

Samuel Abiven a pris en charge la proposition d'un modèle permettant de classer les produits vis-à-vis de leur potentiel intrinsèque de stabilisation des agrégats du sol, mettant en jeu le fractionnement Van Soest (1963) pour caractériser les produits organiques. L'enjeu est de pouvoir, à partir de ces caractéristiques dont le protocole d'analyse est aujourd'hui mis en place dans un grand nombre de laboratoires, prédire son effet sur la stabilité structurale au cours d'une

saison culturale. Confronté aux autres approches (ISMO⁴, potentiel de minéralisation de l'azote), il permettra d'affiner le conseil et ainsi, de mieux maîtriser les impacts environnementaux liés à la gestion des matières organiques. Une formulation mathématique, dans le modèle « Pouloud⁵ » (Abiven et al., 2008) a été proposée pour décrire l'évolution de la stabilité structurale (MWD sw) d'un sol à partir des caractéristiques biochimiques des produits incorporés dans le sol. Ce travail a été réalisé à partir des données d'Abiven et al. (2007). La loi mathématique la mieux adaptée à la description de la forme des dynamiques de stabilité structurale est une fonction log-normale (équation (a), figure 7)

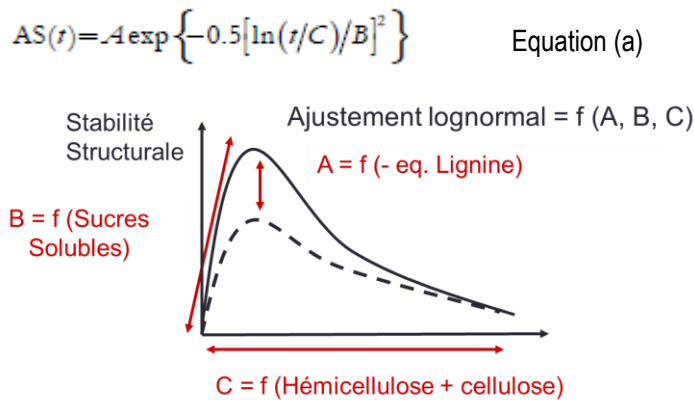


Figure 7. Description de la dynamique de la stabilité structurale, en conditions potentielles de laboratoire, selon une loi log-normale, où A décrit l'amplitude de l'effet, B, l'échelle de temps nécessaire à la mise en place de cet effet et C la durée de l'effet.

Les paramètres A, B, C ont été calculés pour chacun des produits en ajustant l'équation de la courbe aux valeurs observées (figure 8) (RMSE = 7 %, 9%, 16 %, 11% respectivement pour les résidus de chou fleur, le compost, le fumier et la paille de blé).

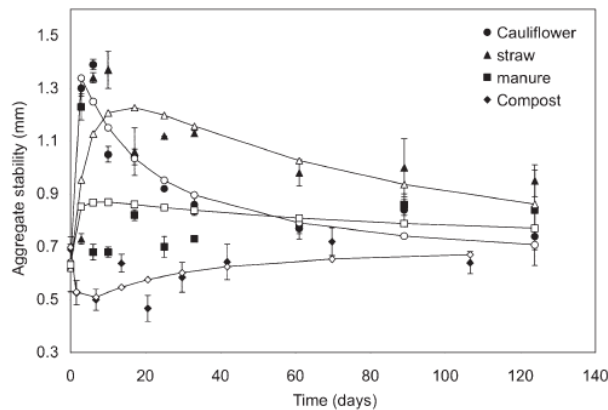


Figure 8. Ajustement de la loi log-normale (symboles vides) sur les valeurs observées (symboles pleins) de dynamiques de stabilité structurale (Abiven et al., 2008).

⁴ Indice de stabilité de la matière organique

⁵ Pouloud : « agrégat » en breton

Par la mise en œuvre d'une analyse en composantes principales, des relations entre les paramètres de cette loi et les caractéristiques biochimiques des produits ont été proposées. L'équation (a) devient alors :

$$AS(t) = (-0.0068L + 1.143) \exp \left[-0.5 \ln \frac{t / (0.0289HC - 6.947)}{0.00768EP + 1.486} \right]$$

Où L est la teneur en équivalent Lignine (g de matière sèche.kg⁻¹), HC, la teneur en équivalent holocellulose (hémicellulose+cellulose) (g de matière sèche.kg⁻¹) et EP la teneur en polysaccharides extractibles à l'eau (gC.kg⁻¹). Dans notre étude, les différences de comportement ne peuvent être expliquées par la seule caractérisation Van Soest des produits. En effet, les composts sont caractérisés par une fraction soluble aussi importante que les résidus de cultures. Pour autant, leur décomposition a été moins effective et donc leur effet sur la stabilité structurale aussi. La composition de la fraction soluble Van Soest (extraction au détergent neutre qui est du tetraborate de sodium) varie en fonction de la famille de produits étudiée. Cette solution est parfois utilisée pour extraire des substances humiques à faible poids moléculaire (Bruckert, 1979). Une quantification des sucres extractibles à l'eau a été réalisée et considérée comme plus représentative de la décomposabilité des produits organiques que la fraction soluble. Ainsi, l'amplitude de l'effet (paramètre A) dépend de la teneur en lignine, le temps nécessaire à la mise en place de cet effet (paramètre B), de la teneur en sucres solubles et la durée de l'effet (paramètre C), de la teneur en holocellulose.

Des fonctions de limitations vis-à-vis de la température, de l'humidité du sol et de la disponibilité de l'azote, sont ensuite considérées afin de transposer la modélisation de la dynamique de la stabilité structurale en conditions contrôlées de laboratoire à des conditions de plein champ⁶ où ces facteurs de l'environnement sont variables. Ces fonctions sont celles considérées dans les modèles de décomposition des matières organiques (Myers et al., 1982, Recous et al, 1994, Molina et al., 1983). La disponibilité en azote intervient en favorisant le potentiel de décomposition des produits organiques à C/N élevé, et en augmentant ainsi, leur effet sur la stabilité structurale.

⁶ Cela a été rendu possible grâce à la mise en place en parallèle des incubations en conditions contrôlées de laboratoire, d'un essai au champ conduit en sol nu, à la Rimbaudais sur le site expérimental du Cotig (tableau 1) permettant, grâce à un dispositif en 4 blocs, d'étudier les mêmes produits. Les résultats correspondants ne sont pas présentés ici.

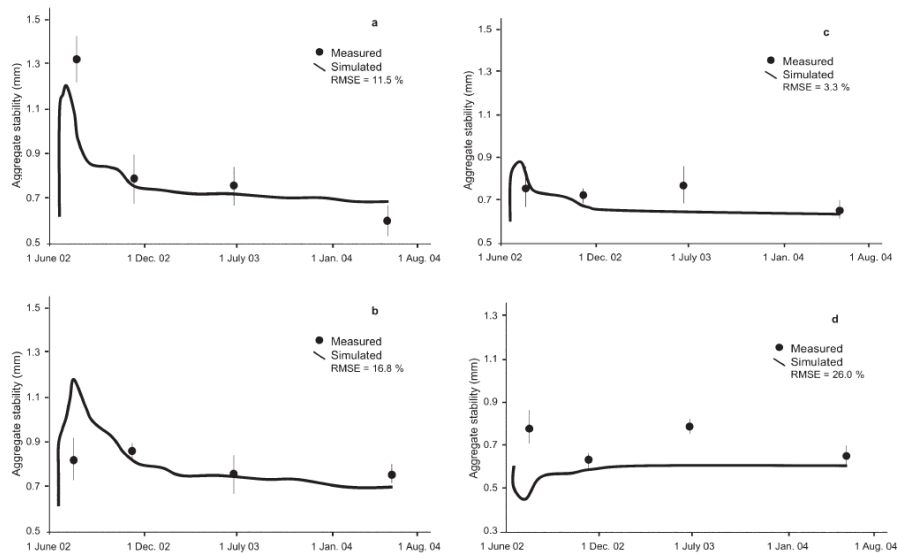


Figure 9. Simulation de l'effet de résidus de chou fleur (a), d'une paille de blé (b), d'un fumier (c), d'un compost (d) sur la stabilité structurale en conditions de plein champ (Abiven et al., 2008).

L'hypothèse forte ici est de considérer que les facteurs de l'environnement tels que la teneur en eau du sol, sa température et la teneur en azote minéral, influencent la dynamique de la stabilité structurale parce qu'ils influencent la décomposition des produits organiques. Le modèle reproduit de manière satisfaisante la dynamique de la stabilité structurale au champ, particulièrement suite à l'apport de fumier de bovin (RMSE=3.3 %) (figure 9). La prédiction de cette dynamique au cours des premières semaines reste à améliorer. Une amélioration du modèle passerait par la prise en compte du fait que les produits enfouis au champ sont frais. Des phénomènes de « priming effect » peuvent avoir lieu. Par ailleurs, au champ, il y a à la fois formation d'agrégats, stabilisation et destruction des agrégats par la pluie par exemple.

Cette approche pourra être confrontée aux travaux de Lashermes et al. (2009) qui ont proposé un modèle qui permet de caractériser le potentiel humique d'un produit organique et de Morvan et al. (2006), une typologie qui permet de classer les produits vis-à-vis de leur potentiel de minéralisation de l'azote. **La reprise de cette démarche de modélisation dans le cadre de la thèse de Jérémy Dénès et du programme de recherches ETYC est présentée dans le chapitre « VI. Perspectives ».**

V.1.2. Activité biologique, diversité microbienne et processus d'agrégation

Master 2 de Cédric Le Guillou (Co-encadrement avec Gaetan Le Floch et Georges Barbier (LUBEM⁷)) (Article à rédiger)

Programme de Recherches : PRIR MO-TCS

Thèse de Cédric Le Guillou (Co-encadrement avec Denis Angers (AAC, Québec) et Philippe Leterme, Directeur de de la thèse)

Collaboration avec Pierre Alain Maron (UMR Agroécologie) (Publications 5, 6 et 7)

Les facteurs agrégeants sont issus de l'activité de la biomasse microbienne du sol (bactéries et champignons). Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'activité de la biomasse globale. Nous avons en effet montré le rôle actif des populations microbiennes du sol sur la stabilité des agrégats au cours de la décomposition de produits organiques (Abiven et al., 2007 ; 2008) par le biais de l'augmentation des facteurs agrégeants et plus particulièrement des polysaccharides dans des sols limoneux à faible teneur en matière organique (Abiven, 2007).

Les objectifs de recherche ici étaient de préciser (i) le rôle de la communauté microbienne et de ses différentes composantes, dans le processus de formation d'agrégats stables et, (ii) comment la disponibilité en azote minéral du sol pouvait moduler ce rôle et impacter ainsi la dynamique de la stabilité structurale après la restitution de résidus de cultures.

Nous avons procédé en deux temps en initiant deux séries d'expérimentation en conditions contrôlées de laboratoire.

Dans un premier temps, dans le cadre du projet MO-TCS, et du stage de Master 2 de Cédric Le Guillou, nous avons étudié l'effet de l'apport de produits organiques (paille de blé, fumier de bovins, lisier de porcs) épandus sur le dispositif de Kerguehennec sur la population fongique du sol, quantifiée grâce à des dosages d'ergostérol, et la contribution de cette dernière dans les processus de stabilisation d'un sol limoneux riche en matière organique (Sol 2, tableau 1). Dans la suite du travail mené dans le cadre de la thèse de Samuel Abiven, nous avons dosé, au cours d'incubations, les polysaccharides extractibles à l'eau, la biomasse microbienne totale du sol auxquelles nous avons ajouté des mesures d'hydrophobicité caractérisée par le temps de pénétration d'une goutte d'eau. Parmi les micro-organismes du sol, les populations fongiques jouent un rôle important et reconnu dans les processus d'agrégation et de stabilisation de la structure (Degens et al., 1996). Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre aucun des facteurs agrégeants étudiés et la stabilité structurale, tout produit confondu. Les partenaires du projet, de l'équipe LUBEM de l'UBO (G. Le Floch et G. Barbier) ont caractérisé la diversité fongique par CE-SSCP. L'expression des populations fongiques a varié dans le temps, en fonction du type de produits et une relation entre la structuration de la diversité fongique et la stabilité structurale a pu être mise en évidence pour la paille et le fumier de bovins. Une étude plus approfondie par une analyse multi variée devrait être menée. Ce sont des résultats qui restent à publier et que je ne développe pas ici.

⁷ LUBEM : Laboratoire universitaire de biodiversité et écologie microbienne (Université de Bretagne occidentale)

Dans un deuxième temps, il nous est apparu intéressant d'étudier plus précisément l'hypothèse selon laquelle l'ajout d'azote en favorisant la décomposition de produits organiques et plus particulièrement, de résidus de culture à C/N élevé favoriserait leur effet sur la stabilité structurale. Nous avons considéré cela d'autant plus important que nous sommes dans un contexte agronomique de diminution du recours aux intrants chimiques, dont la fertilisation azotée minérale. Nous nous sommes alors intéressés à étudier la contribution des communautés bactériennes et fongiques en situations limitantes ou pourvues en azote, sur le processus d'agrégation et de stabilisation de la structure du sol.

V.1.2.1. Etude de l'effet de l'interaction entre disponibilité en azote et caractéristiques biochimiques de résidus de cultures sur la dynamique de la stabilité structurale en conditions contrôlées de laboratoire

La disponibilité en azote minéral est fondamentale pour la décomposition de produits organiques à C/N élevé, dont les résidus de cultures (Recous et al., 1995). Dans le modèle « Pouloud » l'hypothèse a été faite que l'azote minéral du sol modulait la dynamique de la stabilité structurale dans la mesure où il intervenait sur la décomposition des produits organiques, notamment ceux à C/N élevé. D'autres auteurs partagent ce point de vue (Avnimelech and Cohen, 1989 ; Hadas et al., 1994). Or, bien que les études soient peu nombreuses, certains auteurs ont montré que l'ajout d'azote minéral conjointement à l'enfouissement des résidus de culture pouvait avoir un effet dépressif sur la stabilité structurale (Schwartz et al., 1958 ; Acton et al., 1963; Bossuyt et al., 2001).

Nous avons choisi des résidus de cultures à C/N et à teneur en lignine différents (tableau 3), dont on a suivi la décomposition en conditions d'N non limitant (+N) et d'azote limitant (-N). Ces résidus de culture ont été mélangés au sol 3 (tableau 1).

Tableau 3. Caractéristiques biochimiques des résidus de cultures.

Résidus de culture	C/N	Lignin/N	Soluble	Eq-hemicellulose	Eq-cellulose	Eq-lignine
				% de la matière sèche		
Avoine non mature	18.8	0.5	59.9	23.2	15.8	1.1
Paille de blé	125.6	21.2	13.2	34.0	45.6	7.2
Miscanthus	311.3	88.1	6.3	28.1	52.4	13.2

Lors du suivi de l'incubation, une minéralisation très rapide du carbone dans le traitement « Avoine » induisant des conditions d'anoxie dans les bocaux, nous a amené à ne pas considérer les résultats obtenus dans ce traitement.

Nous avons mis en évidence le fait que le facteur « disponibilité en azote » modulait l'effet de la décomposition des résidus selon 2 phases (Figure 10): (i) une phase rapide (de l'ordre de la semaine) d'augmentation de la stabilité de la structure du sol qui était positivement contrôlée par la décomposabilité initiale du résidu, et ce sans interaction avec l'azote minéral disponible du sol puis (ii) une seconde phase (de 7 à 56 jours) au cours de laquelle, la stabilité de la structure du sol augmentait ou se maintenait à un niveau élevé dans les traitements sans apport initial d'azote minéral tandis qu'elle diminuait ou se maintenait à un faible niveau dans les traitements avec apport initial d'azote minéral (Le Guillou et al., 2011).

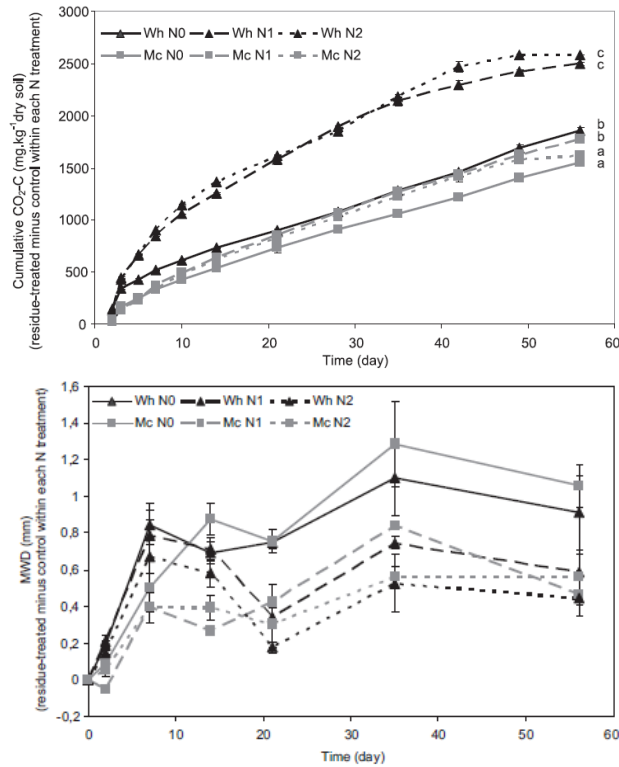


Figure 10. Respiration cumulative (a) et dynamique de la stabilité structurale représentée par le MWD (b) (traitement - sol témoin). Les traitements sont la paille de blé (Wh) et le miscanthus (Mc) combinés avec trois modalités d'ajout d'azote minéral: pas d'ajout (0N), un ajout de 60 mg N.kg⁻¹ (N1) et un ajout de 120 mg N kg⁻¹ (N2). (Le Guillou et al., 2011)

La minéralisation du carbone des résidus à C/N élevé a été augmentée dans les traitements (+N). Cependant, elle ne s'est pas accompagnée d'une augmentation de la stabilité structurale (Figure 11). L'effet de la décomposition initiale des résidus de culture sur la stabilité structurale dépend de sa composition biochimique intrinsèque et non pas de facteurs environnementaux (ici la disponibilité en azote minéral). A l'inverse, lorsque la phase de décomposition active est passée, la disponibilité en azote constitue le facteur dominant, avec des valeurs de stabilité structurale plus élevées dans les situations en azote limitant.

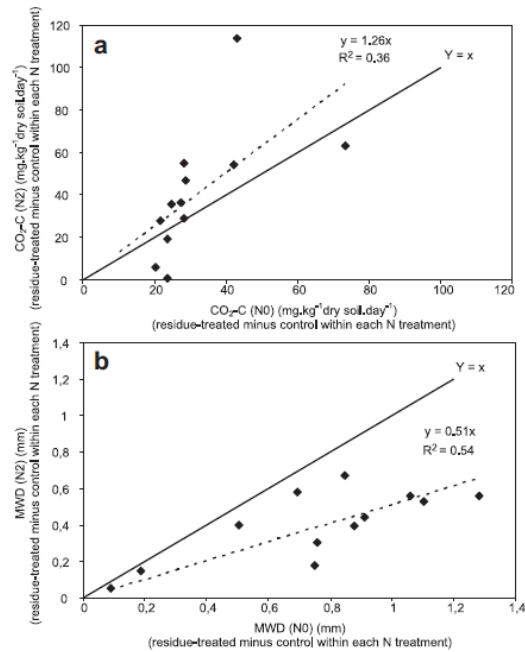


Figure 11. Effets de l'ajout d'azote minéral sur (a) la respiration (résidu+N-résidu-N) et (b) la stabilité structurale (MWD). Chaque point est la moyenne de 3 réplicats. Les droites de régression sont significatives à $P = 0.05$. (Le Guillou et al., 2011)

Ce résultat nous a amené à faire l'hypothèse que des populations microbiennes spécifiques efficaces vis-à-vis de la stabilisation des agrégats étaient favorisées par des conditions limitantes en azote.

V.1.2.2. Rôle de la diversité microbienne et proposition d'un modèle conceptuel

Grâce à la collaboration mise en place avec l'UMR Agroécologie, de l'INRA de Dijon, la caractérisation de la diversité microbienne (bactérienne et fongique) par la méthode ARISA (Ranjard et al., 2003) et la mise en relation avec la dynamique de la stabilité structurale ont été rendues possibles. Cette caractérisation a été associée à des mesures de biomasses microbiennes, d'ergostérols et de polysaccharides extractibles à l'eau aux dates : 0, 7 et 35 jours.

L'analyse en composantes principales des profils de structure des communautés microbiennes montre que l'ajout d'azote minéral induit une modification significative des communautés bactériennes et fongiques pour la paille de blé et le miscanthus (figure 12).

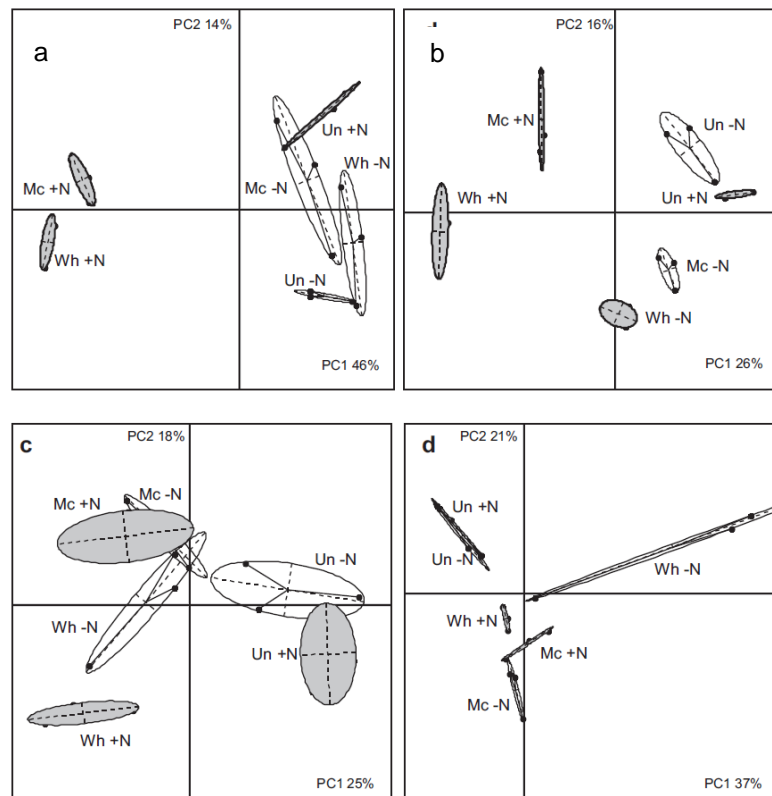


Figure 12. Analyses de la structure génétiques des bactéries (a et b) et des champignons (c et d), au jour 7 (a et c) et au jour 35 (b et d). Les ellipses sont établies statistiquement avec un intervalle de confiance de 90 %. Témoin (Un), Paille de blé (Wh), miscanthus (Mc), sans azote (-N), avec azote (+N). (Le Guillou et al., 2012)

L'azote est un facteur important de structuration des communautés bactériennes puisque pour les deux dates, les profils dans les traitements « paille de blé » et « miscanthus » avec azote sont opposés à ceux « sans azote » sur l'axe 1. Concernant les communautés fongiques, au jour 7, on note une discrimination des profils de structure en fonction de l'incorporation ou non du résidus de culture, sur le premier axe (les traitements « paille » et « Miscanthus » sont à gauche de l'axe alors que le témoin est à droite) et, en fonction de la qualité du résidus de culture, sur le deuxième axe. L'azote a un effet discriminant sur les profils développés dans les traitements ayant reçu de la paille au jour 35. Des communautés fongiques spécialisées dans la décomposition de molécules plus complexes apparaissent dans la deuxième phase d'incubation (McGuire and Treseder, 2010). Alors que l'apport d'azote associé à une incorporation de résidus de cultures riches en lignine conduit à une augmentation des quantités d'ergostérol (figure 13) comme cela a été observé dans le cadre de la thèse de N. Amougou (2011), la limitation en azote pourrait contribuer à une spécialisation de ces communautés vers des communautés fongiques plus efficaces vis-à-vis de la stabilisation (Martin et Anderson, 1943) car particulièrement impliquées dans la production de polysaccharides.

Les sucres extractibles à l'eau ont significativement augmenté au bout des 7 premiers jours d'incubation dans tous les traitements avec des niveaux significativement plus élevés dans le traitement paille+N comparé au traitement paille-N (figure 13). Entre 7 et 35 jours d'incubation, une importante diminution des sucres extractibles à l'eau a été observée dans les traitements avec apport d'azote alors que l'inverse a été observé dans les traitements sans apport d'azote. Au 35^e jour, les niveaux de sucres extractibles à l'eau sont significativement plus élevés dans les

traitements +N que dans les autres ($P < 0.01$). Les microorganismes du sol produiraient des polysaccharides lorsque leur respiration est limitée par un manque d'azote (Knapp et al., 1983; Hadas et al., 1998) alors que d'autres opportunistes, stimulés par l'ajout d'azote consommeraient ces polysaccharides, une fois le carbone facilement dégradable des résidus incorporé est minéralisé.

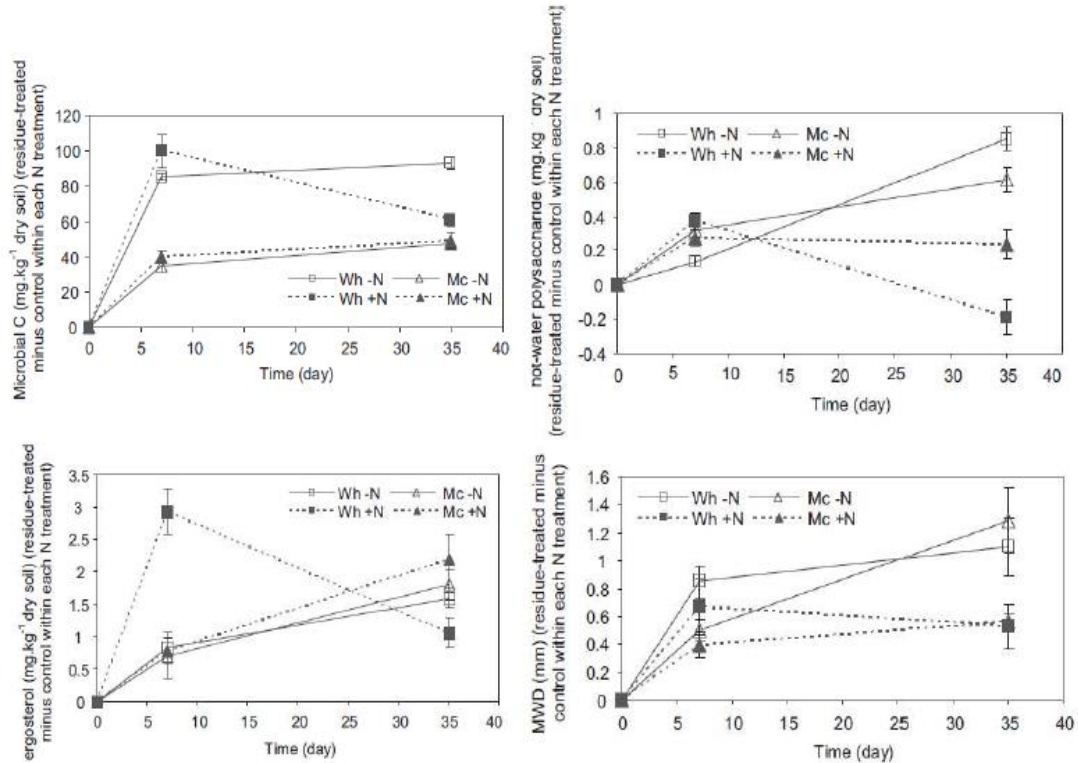


Figure 13. Dynamiques de l'extractible microbien, sucres extraits à l'eau chaude, de l'ergostérol et de la stabilité structurale (MWD sw) exprimées en différence au témoin. Témoin (Un), Paille de blé (Wh), miscanthus (Mc), sans azote (-N), avec azote (+N) (Le Guillou et al., 2012)

Six et al. (2004) indiquaient que le facteur principal déterminant la composante microbienne du sol était la disponibilité en carbone et en azote. Nos travaux ont permis de préciser le rôle des communautés microbiennes dans la dynamique de la stabilité structurale du sol en fonction de la disponibilité de ces deux éléments (Figure 14). Nous avons mis en évidence que l'augmentation de la stabilité de la structure du sol dans la première phase (I) était liée à l'augmentation rapide de la biomasse microbienne totale du fait de l'accès des microorganismes à des substrats carbonés biodisponibles (fraction soluble labile des résidus), donc dépendante de la qualité biochimique des résidus de culture. Nos résultats suggèrent que, durant la seconde phase (II), le niveau de stabilité structurale est conditionné par la disponibilité en azote minéral et corrélé aux polysaccharides microbiens. Pendant cette seconde phase, la diminution ou la stagnation de la stabilité structurale du sol était associée à la consommation d'agents liants (polysaccharides microbiens) par des populations bactériennes stimulées par l'apport d'azote minéral. Inversement, en absence d'apport d'azote minéral, l'augmentation de la stabilité structurale du sol était liée à la production de polysaccharides par des populations fongiques se développant sur les substrats carbonés complexes. En effet, la production de sucres agrégeants est d'autant plus importante que l'azote est limitant.

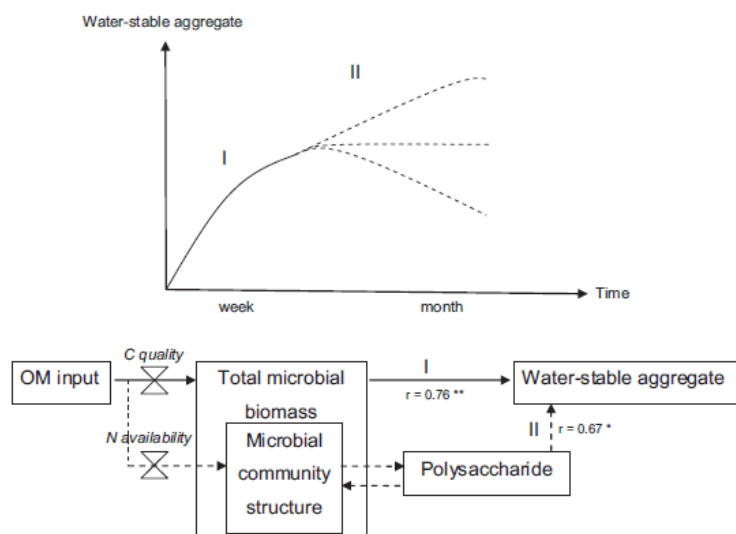


Figure 14. Représentation conceptuelle de la contribution microbienne à la variation sur le court terme des agrégats stables à l'eau, suite à un apport organique à C/N élevé. (Le Guillou et al., 2012)

Nous pouvons conclure à partir de nos résultats, comme Fonte et al. (2009), que la fertilisation azotée entraîne une diminution de l'agrégation et de la stabilisation des agrégats et ce particulièrement lorsqu'elle est associée à une restitution de résidus de cultures à C/N élevé. Cette conclusion s'appliquerait aux sols des régions tempérées, habituellement bien pourvus en N.

V.1.2.3. Rôle des communautés microbiennes lors de la décomposition de résidus de cultures à C/N contrastés, dans un sol nu, en conditions hivernales

Parallèlement aux travaux suivis au laboratoire, décrits ci-dessus, nous avons conduit une expérimentation au champ en conditions hivernales et de sol nu (SOL3, tableau 1), au cours de laquelle nous souhaitons étudier l'effet de l'apport de résidus de culture sur la stabilité des agrégats, in situ. L'essai a été conduit suite à la fin de l'essai de longue durée de Champ Noël conduit par l'UMR SAS à Rennes. Le dispositif (5 blocs) a été mis en place sur une parcelle anciennement occupée par une rotation maïs-blé avec exportation des résidus de cultures et ayant reçu une fertilisation exclusivement minérale depuis 1995. Pour permettre une comparaison avec les résultats obtenus au laboratoire, les résidus ont été séchés à 60°C et hachés à 3-5 cm.

Dans tous les cas, l'incorporation des résidus de cultures dans un sol permet d'augmenter de manière significative la stabilité structurale de ce sol, comparativement au contrôle dont la stabilité structurale a diminué en hiver (figure 15). Pendant le premier mois, l'effet dépend de la composition biochimique des résidus de culture avec un effet plus marqué pour les résidus de culture caractérisés par la fraction soluble la plus importante. Par ailleurs, nous avons confirmé l'effet important de l'apport de résidus de culture à C/N élevé sur la stabilisation de la structure d'un sol quand la teneur en azote minéral est faible. Si l'on considère l'ensemble de la période étudiée, cet effet des résidus à C/N élevé est équivalent à celui d'un résidu à C/N faible (figure 15).

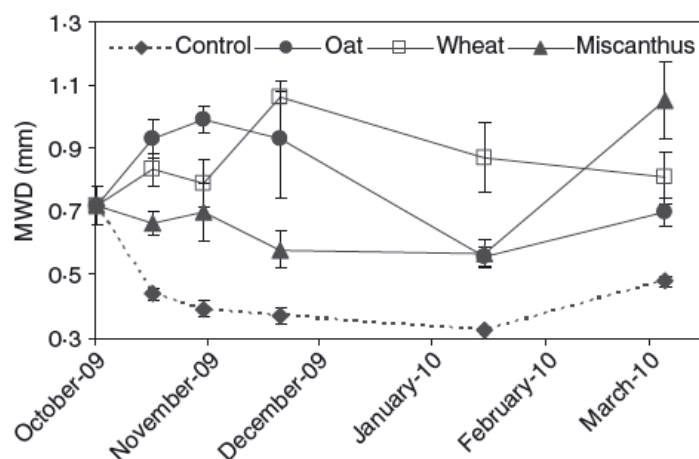


Figure 15. Dynamique de la stabilité structurale MWD pendant le suivi in-situ. Les barres représentent l'erreur standard (n=5) (Le Guillou et al., 2010)

Tableau 4. Coefficients de corrélation r entre le MWD et les marqueurs microbiens à 29, 50 et 154 jours après le début de l'expérimentation.

	Muramic acid	Glucosamine	Total amino sugars
Day 29	0.48*	0.40	0.43
Day 50	0.63**	0.59**	0.53*
Day 154	0.10	0.27	0.30

* $P=0.05$; ** $P=0.01$; *** $P=0.001$

Le suivi de marqueurs biochimiques microbiens⁸ – l'acide muramique, marqueur des bactéries et la glucosamine, marqueur fongique (Parsons, 1981 ; Amelung, 2001) – suggère que l'effet sur la stabilité structurale de résidus ayant une fraction carbonée labile accessible est rapide et lié à la stimulation de la croissance des bactéries. La corrélation entre la stabilité structurale et le marqueur bactérien est en effet significative à 29 jours, date du pic de l'effet de l'avoine sur la stabilité structurale (tableau 4). En effet, les produits facilement biodégradables sont préférentiellement décomposés par les bactéries (Rousk et Baath, 2007 ; Engelking et al., 2007). Puis, on observe une corrélation significative entre la stabilité structurale et chacun des deux marqueurs au cinquantième jour indiquant que l'effet plus tardif d'un résidu dont la fraction carbonée est plus récalcitrante est lié aux changements de populations bactériennes et fongiques au cours du temps (tableau 4). Ce qui indiquerait que l'effet de résidus de cultures à C/N élevé serait lié à la biomasse microbienne totale (Kushwaha et al., 2001) ou son activité (De Gryze et al., 2005). Ce que nous avons effectivement montré en conditions contrôlées de laboratoire mais uniquement pendant la phase de décomposition active. Les analyses de la glucosamine n'ont pas permis de mettre en évidence un probable développement d'une population fongique en fin de suivi, notamment sous la modalité Miscanthus.

⁸ Analyses réalisées à AAC Québec

V.1.3. Effet de la culture sur le potentiel de stabilisation de la structure du sol des matières organiques restituées au sol

Collaboration avec Nouraya Akkal (équipe ASAE, UMR SAS)

Communication F6, publication en cours de finalisation

Suite aux travaux menés dans le cadre de la thèse de Samuel Abiven, l'objectif ici, était d'étudier comment le végétal modulait l'effet des produits organiques précédemment étudiés (résidus de chou fleur, fumier de bovins et compost de déchets verts) sur la stabilité structurale. De nombreuses études ont porté sur l'effet du système racinaire sur l'agrégation mais il existe peu d'étude sur les interactions entre croissance d'une culture et effet de la décomposition des produits enfouis au sol. L'hypothèse est la suivante : la présence de la culture intervient à deux niveaux : (i) en modulant la disponibilité en eau et en azote minéral et (ii) en produisant, via son système racinaire, des exsudats racinaires, entrées de carbone labile dans le système.

Nous avons donc mis en place, dans la même station expérimentale de la Rimbaudais, un essai croisant deux facteurs (4 blocs): le type d'apport organique (pas d'apport, résidus de chou-fleur, fumier de bovins, et compost de déchets verts) et l'occupation du sol (sol nu, culture de chou-fleur). L'essai a été conduit sur un cycle cultural de chou-fleur, de juin à janvier. Nous avons suivi au cours du temps la teneur en eau du sol, la quantité d'azote minéral, la stabilité structurale. A trois dates, au démarrage de l'essai (t0), à la fin de la croissance végétative du chou-fleur (120 jours) et après la récolte (210 jours), nous avons mesuré les sucres extractibles à l'eau et les biomasses microbiennes des sols.

Les teneurs en eau n'étaient pas significativement différentes entre les différents traitements et toujours maintenues à des valeurs proches de la capacité au champ, du fait des conditions climatiques.

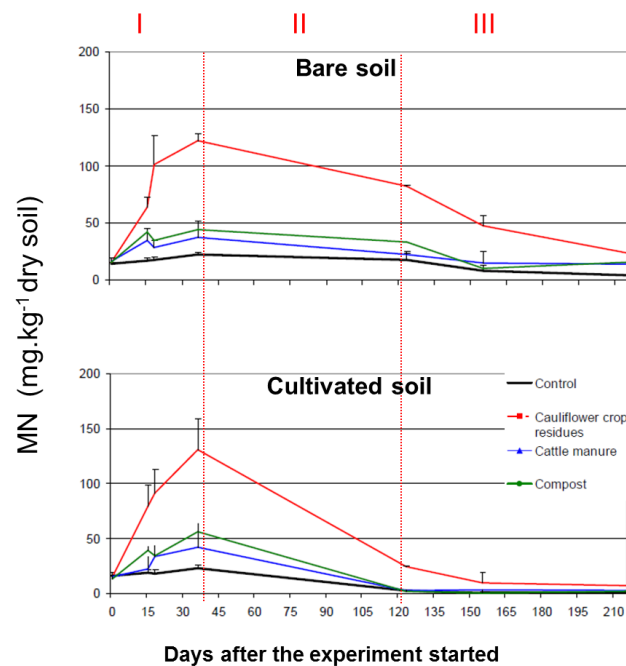


Figure 16. Evolution de l'azote minéral (MN) en fonction du temps.

Les observations des teneurs en azote minéral du sol nous ont permis, en revanche, d'identifier trois phases (figure 16): une phase I (0-40 jours) de décomposition et minéralisation importante des produits organiques, particulièrement des résidus de chou-fleur, une phase II (40-120 jours) de consommation dominante de l'azote par la culture (et sûrement de lessivage en sol nu) et une phase III (120-210 jours) au cours de laquelle les teneurs en azote du sol sous cultures sont très proches de 0 pour tous les traitements. Pendant la phase I, sous sol nu ou sous culture, nous observons une augmentation de la stabilité structurale liée à l'incorporation des produits organiques (figure 17). Cependant, in situ, la différence d'effet entre les produits a été moins marquée qu'au laboratoire, puisque sous sol nu les 3 produits ont induit une augmentation équivalente de la stabilité structurale pendant la phase I. Dans notre étude, malgré les nombreuses opérations culturales, le processus d'agrégation et de stabilisation l'emporte sur les processus de dégradation pendant la phase de décomposition des produits sous sol nu, et de croissance végétative sous le couvert végétal. Le travail du sol stimule la décomposition des produits. Cela peut également être lié à la méthode de pré-calibration des agrégats entre 3-5 mm qui sélectionnerait les plus stables. Néanmoins, cette évolution positive est intéressante à relever et discuter.

A la fin de la phase II, alors qu'aucun effet significatif de la culture comparée au sol nu, en conditions sans apport de produit organique, n'a été observé, nos résultats ont montré que l'effet des produits organiques sur la stabilité structurale a été significativement augmenté en présence de la culture comparé au sol nu. L'effet le plus important a été obtenu pour le fumier de bovins et le plus faible pour le compost. L'apport organique bénéficie à la culture grâce à la mise à disposition nutriments mais également en améliorant les propriétés physiques du sol (Roldan et al., 1996 ; Caravaca et al., 2002).

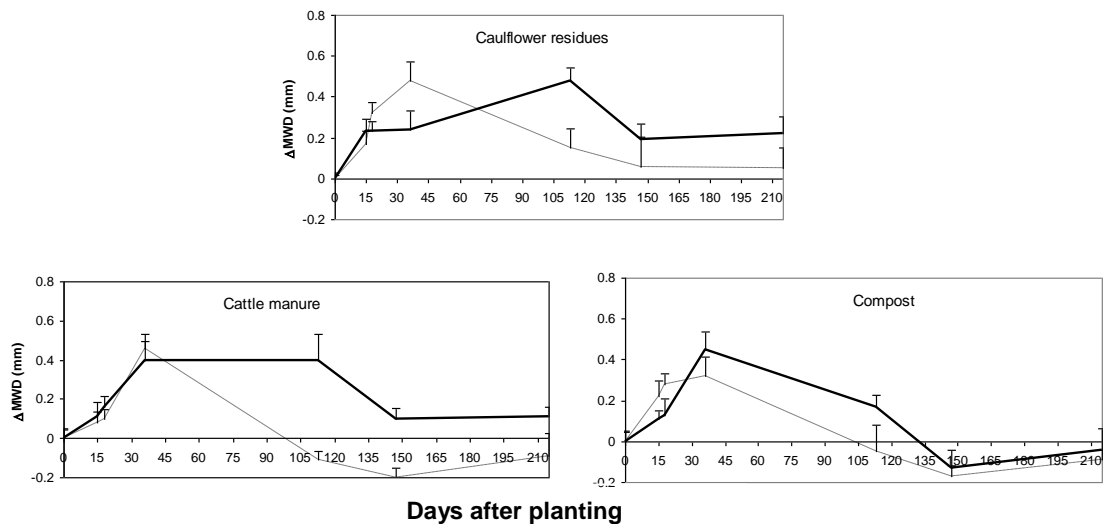


Figure 17. Dynamiques saisonnières de stabilité structurale (MWD) exprimée en différence au témoin sans apport suite à un apport de trois types de produits organiques sous sol nu (ligne en pointillé) et sous culture de chou fleur (ligne pleine). Les barres correspondent à l'erreur standard (n=4).

Ainsi, les produits apportés auraient amélioré de manière significative la rhizodéposition. La libération des composés organiques est influencée par des communautés microbiennes qui sont plus importantes et plus actives dans la rhizosphère que dans le sol. Morel et al. (1991) ont mis en

évidence le caractère agrégeant des exsudats racinaires d'un jeune plant de maïs, le processus étant la stimulation d'associations organo-minérales (Watteau et al., 2006).

Le processus de rhizodéposition dépend du stade de croissance de la culture – le transfert maximal de carbone vers les racines a lieu pendant la phase végétative (Rees et al., 2005) - ainsi que des conditions édaphiques.

La différence significative de niveau d'azote dans le sol peut aussi contribuer à l'explication des différents niveaux de stabilités structurales entre le sol nu et le sol cultivé. Mais les résultats trouvés dans la littérature sont contradictoires. Selon Darwent et al. (2003), des quantités d'azote plus importantes augmenteraient la concentration en sucres solubles des racines, sur le court terme. Jung et al. (2011) ont montré un effet négatif de l'apport d'azote sur le développement racinaire et le pourcentage d'agrégats stables à l'eau sous une culture de panic érigé.

Nous avons cherché à établir des corrélations entre la biomasse microbienne qui a été mesurée à trois dates (t0, t120j et t210j), et la stabilité structurale. Deux relations se distinguent (figure 18): une, entre l'ensemble des biomasses mesurées à t0 et t210, et une particulière à t120j. A cette date, les valeurs de biomasses microbiennes sont significativement plus élevées sous cultures que sous sol nu. La pente de la droite est supérieure à celle obtenue sur les autres dates, indiquant une efficacité plus importante de la biomasse microbienne vis-à-vis du processus de stabilisation, à cette date. La rhizodéposition entraîne une augmentation nette de la biomasse microbienne en fin de croissance (Böhme et Böhme, 2006) ainsi qu'une stimulation de son activité en cours de croissance du végétal qui favorise la stabilisation des agrégats (Angers et Caron, 1998). En revanche, aucune relation n'a été trouvée entre les sucres extractibles à l'eau et la stabilité structurale.

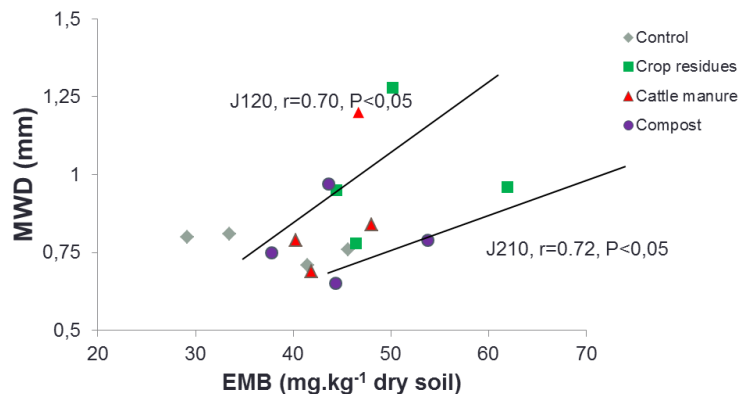


Figure 18. Relations entre biomasses microbiennes exprimées sous forme de carbone extractible microbien (EMB) et la stabilité structurale (MWD).

Nous avons ainsi montré que la culture augmentait significativement l'effet positif d'un apport organique sur la stabilité structurale, notamment en fin de phase végétative correspondant, pour cette culture de chou-fleur, à l'automne. Deux facteurs d'explication peuvent être mis en cause : la teneur en azote minéral du sol plus faible, et l'activité microbienne plus élevée sous culture comparée au sol nu. Ce qui confirme que cette mise en relation n'est pas toujours évidente à mettre en évidence. Nous pouvons aussi suggérer que l'effet positif de la rhizodéposition lors de la croissance d'une culture dépend du type de produit organique apporté.

V.2. Etude de la dynamique de stabilité structurale selon différentes modalités de travail dans un système de culture fourrager

Thèse de Nicolas Bottinelli (Co-encadrement avec Daniel Cluzeau (UMR EcoBio) et Vincent Hallaire, Directeur de la thèse) (publication en cours de finalisation pour soumission prochaine)

Programme de recherches : PRIR MO-TCS

Le développement de la réduction du travail devrait contribuer à freiner la baisse des teneurs en matières organiques constatée en Bretagne (Heddadj et al., 2005). Les références dans la littérature sont nombreuses montrant un effet positif des pratiques de fertilisation organique ainsi que de réduction du travail du sol sur la stabilité structurale des sols, et ce, car elles permettent une augmentation des teneurs en carbone des sols en surface (Bissonnette et al., 2001 ; Blair et al., 2006 ; Pikul et al., 2009). Alors que sur le court terme la production de polysaccharides serait particulièrement en cause, sur le plus long-terme, cette amélioration serait plutôt à relier aux substances humiques qui s'accumulent dans les sols. Les pratiques de simplification du travail du sol peuvent conduire à une augmentation de l'hydrophobicité des agrégats en surface (Hallet et al., 2001 ; Blanco-Canqui et Lal, 2009 ; Simon et al., 2009). Les fertilisants organiques peuvent également y contribuer du fait des molécules lipidiques qu'ils peuvent contenir. L'accumulation de molécules répulsives augmente la stabilité des agrégats en diminuant le risque d'éclatement lié à une pénétration rapide de l'eau dans la porosité de l'agrégat. Ces processus, malgré leur complexité, ne sont pas à négliger y compris en situation de sol caractérisé par une forte mouillabilité, dans lesquels ils peuvent intervenir de manière significative sur la stabilité structurale du sol (Blanco-Canqui et Lal, 2007).

Cet effet des pratiques de travail du sol associé à celui de la fertilisation organique peut cependant présenter une certaine saisonnalité (Daraghmeh, 2009). Cette saisonnalité est souvent reliée à la variation des teneurs en eau du sol (Perfect et al., 1990). Mais elle dépend aussi du type de sol, du système de cultures, de la méthode utilisée pour mesurer la stabilité structurale. Ainsi les effets des pratiques culturales peuvent être plus ou moins marquées selon les saisons (Kandeler et Murer, 1993 ; Alvaro-Fuentes et al., 2008 ; Daraghmeh et al., 2009).

Nous nous sommes intéressés à l'évaluation de l'effet du non labour et de l'apport de fertilisation organique sur la dynamique de la stabilité des agrégats d'un sol limoneux (Sol 2, tableau 1) sous une rotation maïs-blé-colza-blé. Cette étude a été réalisée 7 années après l'initialisation de l'essai qui comporte trois modalités de travail du sol: le labour conventionnel (MP), le travail superficiel (ST) et le semis direct (NT) combinées à 2 modalités de fertilisation (fumier de volaille et fertilisation minérale). La stabilité des agrégats a été mesurée en surface à 4 dates d'échantillonnage au cours d'une année culturale de blé et durant l'inter-culture qui a suivi. Les sols ont été prélevés sur 0-7 cm.

Aucune interaction entre les modalités de travail du sol et les types de fertilisation n'a été observée (tableau 5). Des effets significatifs des modalités de travail du sol sur la teneur en carbone et les sucres ainsi que sur la stabilité structurale ont été observés. L'apport de fumier de volaille appliqué à la dose agronomique a augmenté faiblement mais significativement la teneur en carbone du sol. Il faut noter qu'il s'agit d'un système à fortes restitutions de carbone puisque les pailles sont systématiquement restituées au sol. Ces dernières représentent une entrée de carbone équivalente à celle de la fertilisation organique (2.2 TC/ha/an, Viaud et al., 2010).

Cette différenciation des teneurs en carbone liée à la fertilisation, même faible, ne s'est pas traduite par un effet significatif sur la stabilité structurale. En règle générale, tous les types d'apport organique ont un effet positif sur la stabilité structurale à plus ou moins long terme. Cependant, cet effet n'est pas directement lié à l'augmentation de la teneur en carbone, indiquant l'importance de la qualité du carbone formé dans le sol en fonction des modes de gestion des parcelles (Leroy et al., 2008).

Tableau 5. Résumé de l'analyse de variance des effets des modalités de travail du sol et de la fertilisation sur la teneur en carbone (SOC), les sucres extractibles à l'eau (HWEC), la teneur en eau (WC), le temps de pénétration d'une goutte d'eau (WDPT) pour l'ensemble de la période (avril 2007-février 2008)

Source of variation	SOC	HWEC	WC	WDPT	MWD _{sw}
Tillage (T)	<0.001***	<0.001***	0.43	0.83	<0.001***
Fertilization (F)	0.016*	0.22	0.12	0.35	0.053
T×F	0.92	0.77	0.90	0.69	0.78

*, **, *** significatif à respectivement P<0.05, 0.01 and 0.001

Comparée à la situation initiale (sol 2, tableau 1), le labour, combiné à des entrées de carbone importantes, n'a pas entraîné de baisse significative de la stabilité structurale alors que cette dernière a augmenté sous les modalités de réduction du travail, avec, conformément à la littérature, des valeurs significativement plus élevées sous travail superficiel et semis direct (Angers et al., 1993b; Alvaro-Fuentes et al., 2008; D'Haene et al., 2008).

Tableau 6. Effets des modalités de travail du sol et de la fertilisation sur la teneur en carbone (SOC), les sucres extractibles à l'eau (HWEC, la teneur en eau (WC), le temps de pénétration d'une goutte d'eau (WDPT) pour l'ensemble de la période (avril 2007-février 2008). MP : labour, ST : travail superficiel, NT : semis direct.

Source of variation	SOC	HWEC (g kg ⁻¹)	WC	WDPT (s)	MWD _{sw} mm
Tillage					
MP	20.30a	1.04a	276a	1.55a	1.15a
ST	23.41b	1.29b	293a	1.53a	1.46b
NT	24.42b	1.44b	293a	1.45a	1.55b
Fertilization					
Mineral	22.25b	1.21a	278a	1.57a	1.31a
Organic	23.17a	1.30a	297a	1.45a	1.47a

Parmi les résultats les plus importants, nous pouvons souligner deux points :

- Le temps de pénétration d'une goutte d'eau indique que le sol est caractérisé par une forte mouillabilité (WDPT<2s, King, 1981). Aucune différence significative n'a été observée entre les modalités de travail du sol malgré les différences de teneurs en carbone du sol. Là encore cela pourrait être attribuée à la qualité du carbone (Chenu et al., 2000) puisque toutes les molécules carbonées ne sont pas hydrophobes (Urbanek et al., 2007 ; Blanco-Canqui, 2010) mais aussi au régime hydrique durant l'essai, comme ce sera développé plus loin.

- Toutes dates confondues, la stabilité structurale (AS) est positivement corrélée aux teneurs en carbone organique et en sucres extraits à chauds ($r=0.91$, $r=0.88$, $P<0.05$). Finalement, à cette échelle de temps et dans ce type de sol relativement riche en carbone, nous pouvons considérer, tout comme Blair et al. (2006) que les sucres extraits à l'eau, autant que les composés

humiques formés par accumulation de la matière organique contribuent à la stabilisation des agrégats.

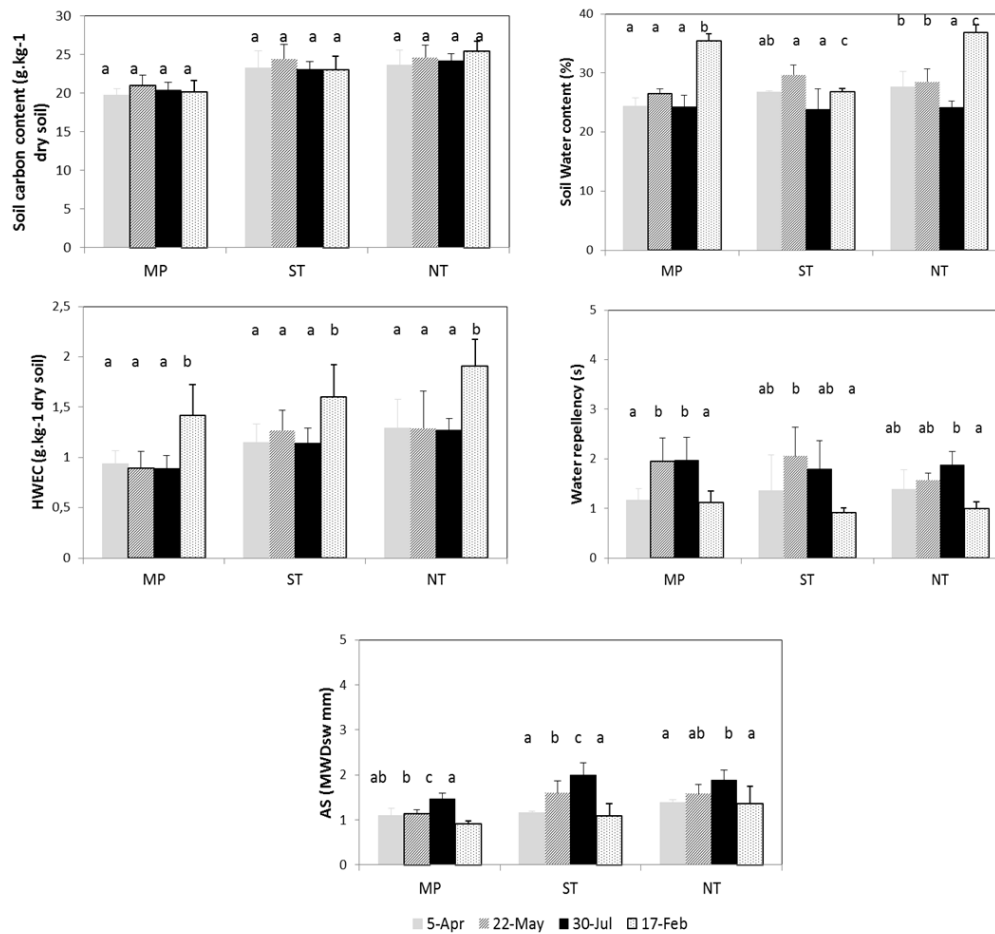


Figure 19. Variations intra-annuelles des teneurs en carbone (Soil C content), des teneurs en eau (Soil water content), des sucres extractibles à l'eau chaude (HWEC), de l'hydrophobicité (Water repellency) et de la stabilité structurale (AS) sous chacune des modalités de travail du sol (MP : labour, ST : travail superficiel, NT : semis direct). Les lettres différentes indiquent une différence significative entre les dates ($P < 0.05$).

La stabilité des agrégats a présenté une importante variation saisonnière caractérisée par une augmentation significative au printemps et en été puis une diminution en hiver (Figure 19). Quelque-soit la date d'échantillonnage, la stabilité structurale a été plus importante sous NT et plus faible sous MP. Cette dynamique saisonnière de la stabilité structurale n'est ni corrélée à la teneur en carbone, ni aux sucres extractibles. De fait, même si les teneurs en polysaccharides extractibles à l'eau ont augmenté en hiver du fait de la présence d'une interculture, la stabilité structurale a diminué. En effet des dynamiques saisonnières de stabilité structurale avec des valeurs élevées au printemps et en été et des valeurs basses en hiver ont été mises en évidence dans des conditions climatiques tempérées similaires (Perfect et al., 1990; Daramagh et al., 2009).

A aucune date de prélèvement, nous n'avons observé de différences significatives de l'hydrophobicité entre les modalités de travail du sol. Nous nous attendions au contraire puisque les vers de terre favorisés par la simplification du travail du sol, augmentent l'hydrophobicité des agrégats car ces derniers auraient une teneur en carbone plus élevée que celle du sol (Chenu et al., 2000) ; la porosité serait diminuée (Jouquet et al., 2008) et un film se formerait à la surface de l'agrégat le rendant lisse et fermé (Blanchart et al., 1993).

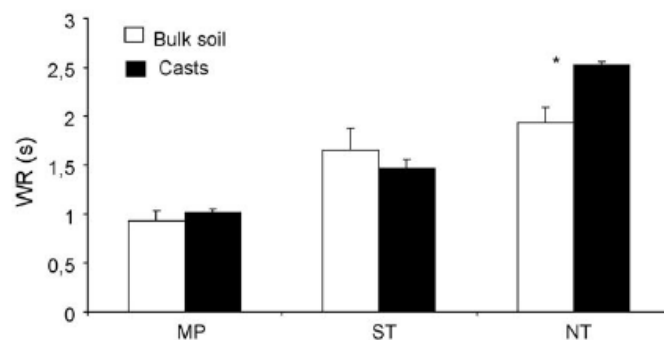


Figure 20. L'hydrophobicité exprimée (WR) des agrégats sous forme de temps de pénétration d'une goutte d'eau en fonction du type de travail du sol : MP, labour, ST, travail superficiel et NT, semis direct. L'astérisque représente la plus petite différence significative (0.05) pour la comparaison des traitements (moyennes \pm erreur standard, n=60)(Bottinelli et al., 2010)

En effet, Bottinelli et al., (2010), ont montré que l'abondance des agrégats issus de cette activité était supérieure dans la modalité « semis direct » comparée aux deux autres modalités de travail du sol et ces derniers avaient une hydrophobicité plus élevée que les agrégats du sol dans cette même modalité alors que ce n'était pas le cas dans les autres deux autres modalités de travail du sol (figure 20). Cependant, cela a été observé à 12 cm et non en surface. Par ailleurs, l'état hydrique du sol a constamment été proche ou au-dessus de la capacité au champ, pendant notre période d'étude. Selon Blanco-Canqui et Lal (2009), les différences d'effet entre modalités sont minimales aux potentiels proches de -30kPa.

Malgré ces absences de différences entre modalités, nous avons pu mettre en évidence une corrélation significative négative entre la dynamique saisonnière de la stabilité structurale avec la dynamique de teneur en eau du sol ($r=-0.67$, $P\leq 0.05$) et significativement positive avec celle du temps de pénétration d'une goutte d'eau ($r=0.72$, $P\leq 0.01$).

La figure 21 montre les relations entre la stabilité structurale et la teneur en carbone organique du sol et la teneur en sucres extractibles à l'eau en fonction des saisons (printemps, été, hiver). On peut noter que les pentes sont similaires quelque soit les dates et pour les deux facteurs agrégeants indiquant une contribution similaire de ces deux facteurs. En février, ces deux facteurs constituent les principaux facteurs de stabilisation des agrégats auxquels s'ajoutent d'autres facteurs au printemps et en été, puisque les droites de corrélation coupent l'axe des ordonnées en un point plus éloigné de l'origine de l'axe des ordonnées (Blackman, 1992). Un facteur supplémentaire, au printemps, pourrait être la quantité de turricules de vers de terre plus importante à cette saison (Binet and Le Bayon, 1999; Perreault et al., 2007, Bottinelli et al., 2010). En été, ces turricules sont plus stables du fait des cycles d'humectation et de dessèchement qui les stabilisent (Marinissen and Dexter, 1990; Hindell et al., 1994).

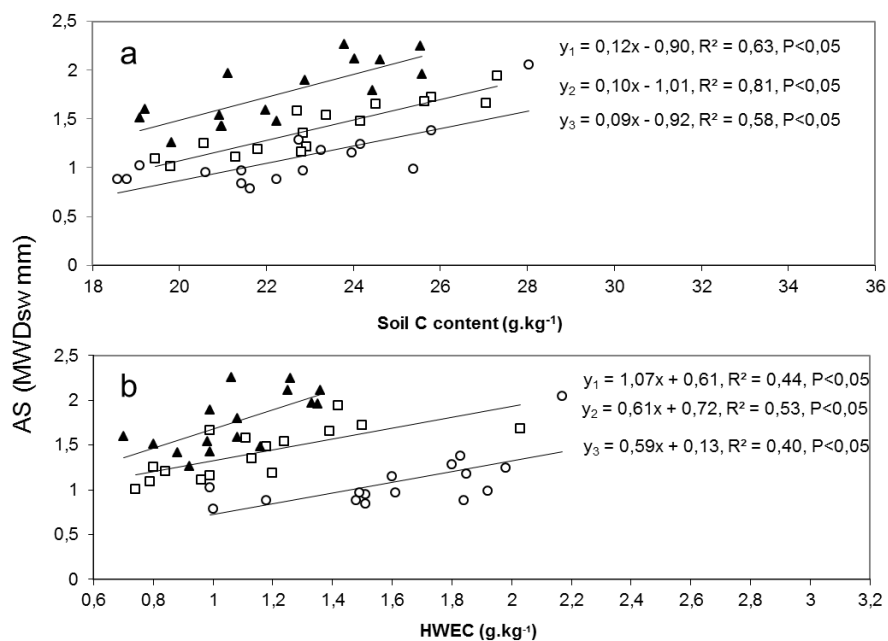


Figure 21. Corrélations entre la stabilité structurale et respectivement la teneur en carbone (a) et la teneur en sucres extractibles à l'eau chaude (b) pour les prélèvements réalisés en mai (y₂, carrés), en juillet (y₁, triangles) et en février (y₃, ronds).

Alors que les teneurs en carbone et en polysaccharides, dans notre contexte pédo-climatique, gouvernent l'évolution de la stabilité structurale, sur le long terme, avec une contribution qui varie selon les saisons, ce sont le régime hydrique et l'hydrophobicité qui modulent les variations saisonnières.

V.3. Effet cumulé des systèmes de cultures contrastés sur la variabilité des niveaux de stabilité structurale des sols cultivés

Collaboration avec Denis Angers (AAC)

Projet réalisé lors de ma mise en délégation financée par l'OCDE, communication F.9, publication en cours de rédaction

La compréhension et la prise en compte des effets conjoints de l'ensemble de pratiques culturales appliquées (Rees et al., 2005) et de leurs interactions avec les facteurs naturels (climat, type de sol, régime hydrique) (Cambardella et al., 2004) dans des approches multifactorielles, s'avèrent essentielles pour optimiser la gestion des MOS dans les agrosystèmes. Nous avons réalisé de nombreuses analyses ces 10 dernières années, dans des réseaux de parcelles d'agriculteurs, qui n'ont pas été valorisées. J'ai profité de mon année de délégation pour réaliser une synthèse de ces données. Il existe plusieurs méthodes de mesure de la stabilité structurale d'un sol. Ce qui complique la réalisation de synthèse bibliographique. Or, nous disposons d'une base de données acquises avec la même méthode standardisée, selon le même protocole d'échantillonnage et de traitement des échantillons. Nous avons ainsi des résultats obtenus sous différents systèmes contrastés de l'ouest de la Bretagne allant de systèmes de cultures légumiers spécialisés (principalement, artichaut, chou fleur, endive) aux prairies permanentes (figure 22). La gamme de systèmes de cultures, tous menés en labour conventionnel, couvre des formes

d'intensification décroissante d'usage des sols dans une même grande région agricole. Ils ont été classés de 1 (système de culture légumier spécialisé) à 7 (prairie permanente) :

- 1, VEG : cultures légumières spécialisées
- 2, VEG-CER_{REM} : cultures légumières en rotation avec des céréales (blé, maïs ensilage) dont les pailles sont exportées
- 3, VEG-CER_{RET} : cultures légumières en rotation avec des céréales (blé, maïs grain) dont les pailles sont restituées au sol
- 4, CER_{REM} : céréales (blé, maïs ensilage) avec exportation des pailles
- 5, CER_{RET} : céréales (blé, maïs grain) avec restitution des pailles
- 6, CER-PAS : céréales (blé, maïs grain) en rotation avec des prairies
- 7, PAS : prairie permanente.

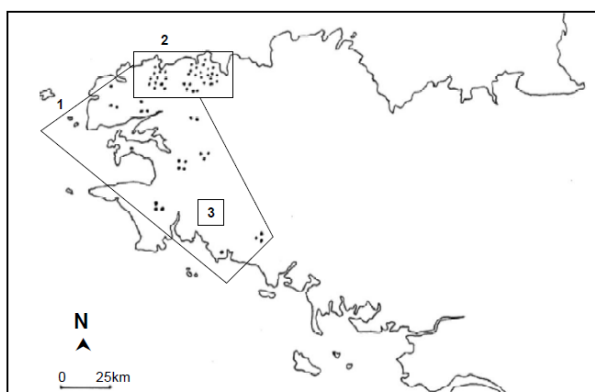


Figure 22. Situation géographique des parcelles étudiées (Bretagne, France).

Les différences entre ces systèmes résident dans les quantités de carbone restituées au sol ainsi que les formes de ce carbone et le nombre d'opérations culturales, très nombreuses en cultures légumières, quasi-inexistantes en prairies permanentes. Ces informations qualitatives associées avec des informations quantitatives mesurées concernant le sol (granulométrie, pH, teneur en carbone organique) et des informations caractérisant la région (le climat (température, pluviométrie), la teneur en carbone organique à l'échelle du canton⁹ (Walter et al., 1997; Lemercier et al., 2006) pour tenir compte du « fond » organique lié au passé d'occupation du sol et à la topographie (Arrouays et al., 2006) ont fait l'objet d'analyses multi-variées dont les résultats sont en cours de discussion et ne sont pas présentés ici. A partir des informations concernant le rendement, la gestion des résidus, le type, la quantité et la fréquence des effluents épandus, dans les systèmes de cultures basés sur des cultures annuelles, la quantité de carbone restituée au sol (à l'exclusion des racines) a été calculée (figure 23).

⁹ Ces informations sont accessibles dans la BDAT (base de données d'analyse de terre) qui est nationale.

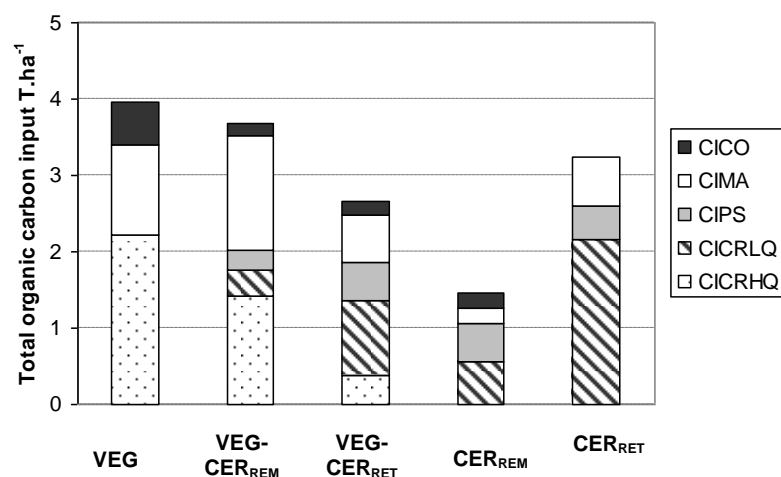


Figure 23. Entrées de carbone moyennes annuelles par systèmes de culture calculées à partir des quantités de carbone sous forme de compost (CO), de fumier de ferme (MA), de lisier de porc (PS), de résidus de culture à C/N < 25 (CICRHQ), de résidus de culture à C/N élevé > 80 (CICRLQ).

Tableau 7. Coefficients de corrélations entre les différentes propriétés du sol.

	Clay	Silt	pH	SOC	MWD _{SW}
Clay	1.00				
Silt	-0.29**	1.00			
pH	-0.56***	0.46***	1.00		
SOC	0.72***	-0.39***	-0.53***	1.00	
MWD _{SW}	0.53***	-0.55***	-0.68***	0.60***	1.00

* $P=0.05$; ** $P=0.01$; *** $P=0.001$

Comme attendu, la stabilité structurale des sols est significativement corrélée au carbone présent dans le sol (Le Bissonnais et Arrouays, 1997; Chenu et al., 2000) (tableau 7). En revanche, il existe une grande variabilité de résultats de stabilités structurales pour un même niveau de teneur en carbone présente dans l'horizon de surface (Figure 24). La stabilité structurale est également positivement corrélée à la teneur en argiles et inversement corrélée à la teneur en limons et au pH.

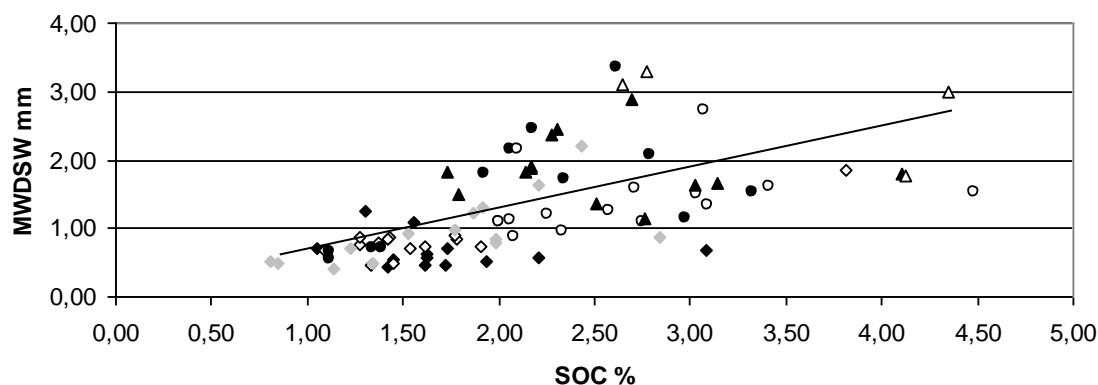


Figure 24. Relation entre la stabilité structurale après réhumectation lente (MWDSW) et la teneur en carbone du sol (SOC). $n=62$, $r=0.59$ ($P<0.05$). Les successions de cultures (CS) sont à base de cultures légumières (\blacklozenge , \diamond , \blacklozenge), de céréales (\bullet , \circ) et de prairies (\blacktriangle , \triangle).

Nos résultats ne rejoignent pas ceux de Kong et al. (2005) selon lesquels la teneur en carbone organique du sol et la stabilité des agrégats à l'eau sont corrélés à la quantité de carbone cumulée restituée au sol. En effet, nous comparons différents systèmes de cultures comprenant des cultures légumières dont les résidus de cultures sont pauvres en lignine et riches en azote et des céréales dont les résidus de cultures sont plus riches en lignine et moins riches en azote. Les types de matières organiques ainsi produits dans le sol sont, de fait, contrastés (Sanaullah et al., 2010) aboutissant à des relations également contrastées avec la stabilité structurale. Les cultures légumières, malgré des restitutions élevées de carbone (figures 23, 24), présentent les niveaux de teneur en carbone et de stabilité structurale les plus basses. Les successions 1 sont caractérisées par des apports de composts plus importants. La pratique qui consiste à insérer une céréale à paille dans la succession (4) associée à une restitution des pailles serait plus efficace vis-à-vis de son effet sur la stabilité structurale que celle d'incorporer du compost tout en maintenant des cultures exclusivement légumières (1). Cela, alors que l'effet sur la teneur en carbone du sol n'est pas significativement différente entre la succession 1 et la succession 4. Les conclusions, auxquelles nous sommes arrivés sur le court terme, selon lesquelles le compost contribue peu à l'évolution de la stabilité structurale, se vérifient sur le moyen terme. Cette pratique ayant été introduite depuis peu d'années, il faut attendre une période de temps plus longue pour que l'effet devienne significatif.

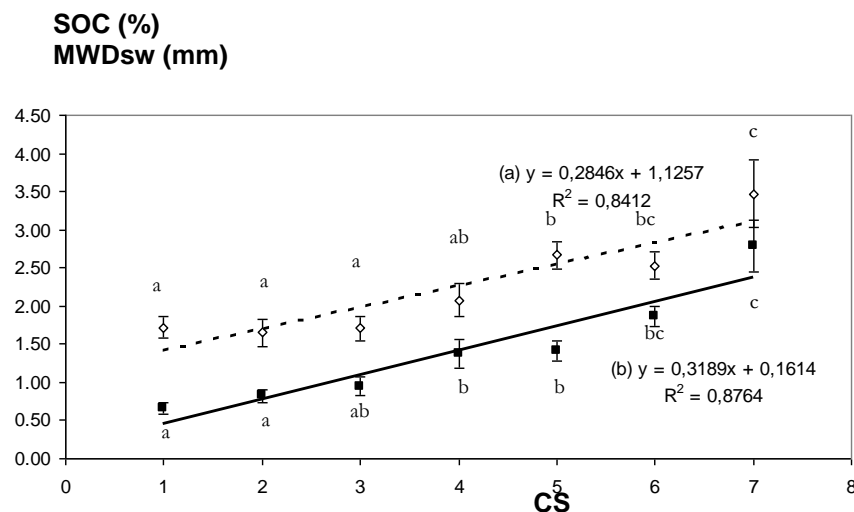


Figure 25. Influence du système de culture (CS) sur (a) le carbone organique du sol (SOC, ◇) et (b) la stabilité structurale (MWD_{sw}, ■). 1, VEG; 2, VEG-CER_{REM}; 3, VEG-CER_{RET}; 4, CER_{REM}; 5, CER_{RET}; 6, CER-PAS; 7, PAS. Les barres sont les erreurs standards. Une lettre différente signifie une différence à $P < 0.05$. Le nombre d'observations est indiqué entre parenthèse.

Nos résultats (figure 25) corroborent ceux de Haynes et al., 1991 selon lesquels la teneur en carbone des sols et la stabilité structurale sont fortement corrélées à l'indice d'intensification des cultures.

Cependant, il est important d'intégrer dans notre réflexion le fait que le choix des systèmes de cultures est étroitement lié au type de sol et au climat. C'est ainsi que les systèmes légumiers sont sur les sols les moins argileux (les plus limoneux) et les prairies permanentes sur les sols les plus argileux (tableau 8).

Tableau 8. Valeurs moyennes, maximum and minimum des propriétés de sol pour chaque système de cultures (SDC) allant de 1 à 7 décrits en page 57.

SDC	Clay %			Silt %			pH			SOC %			MWD _{sw} mm		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
1	13.3	11.6	15	61.8	55.1	68.8	7.4	6.8	7.8	1.7	1.0	3.1	0.7	0.4	1.3
2	14.7	11.2	29.2	55.4	42.0	62.8	7.4	5.8	8.2	1.6	1.1	3.8	0.8	0.5	1.9
3	13.8	9.6	21.5	46.8	27.8	62.5	7.1	5.6	8.3	1.7	0.8	2.8	0.9	0.4	2.2
4	16.1	15.1	18.8	53.9	32.5	71.1	6.0	5.3	6.0	2.1	1.1	3.3	1.6	0.5	3.4
5	19.7	15.7	30.1	46.5	34.2	59.2	6.1	5.1	6.5	2.7	2.0	4.5	1.4	0.9	2.7
6	17.6	14.2	27.1	43.8	28.6	69.7	5.8	5.2	6.3	2.5	1.7	4.1	1.9	1.1	2.9
7	19.3	15.8	23.1	45.6	39.5	51.4	5.7	5.3	6.2	3.5	2.6	4.3	2.8	1.8	3.3

En croisant ces observations avec les résultats obtenus lors des études menées sur les processus, il semble que les systèmes légumiers, particulièrement ceux impliquant des cultures de chou-fleur, caractérisés par des entrées d'azote très élevées par les résidus de cultures et des taux de minéralisation de l'azote élevés (Akkal et al., 2009) favorisent une activité biologique élevée. Cette dernière, plutôt d'origine bactérienne, induirait une production transitoire de polysaccharides, du fait de la nature biodégradable des résidus de cultures, puis de consommation de ces derniers. Ainsi, dans ces systèmes de cultures légumiers spécialisés, les dynamiques cumulées de la stabilité structurale ne permettraient pas une augmentation sur le long terme de cette propriété du sol. Ces systèmes légumiers sont caractérisés par des interventions culturales nombreuses et la pratique du chaulage pour lutter contre la *Hernie du Chou*. L'ensemble des pratiques culturales serait à prendre en compte pour l'analyse des niveaux de stabilités structurales dans les sols car elles modulent l'effet des restitutions organiques à la parcelle (Angers, 1998).

V.4. Conclusion

Les travaux que j'ai menés et encadrés montrent tout d'abord que la stabilité structurale est un indicateur pertinent d'impact du changement des pratiques agricoles sur la qualité du sol, sur les court, moyen et long termes. C'est donc un bon indicateur pour évaluer les systèmes de cultures. Les résultats montrent que les pratiques de fertilisation organique, de restitution des résidus de cultures et de simplification du travail du sol, considérées individuellement, améliorent la stabilité structurale des sols.

Nous avons mis en évidence le caractère dynamique de cette amélioration et préciser le rôle de la diversité microbienne des sols, avec une contribution de la biomasse totale en début de décomposition et de biomasses spécifiques dépendant du type de produit et du niveau de disponibilité en azote minéral, ensuite. Le rôle des facteurs agrégeants (surtout polysaccharides extractibles à l'eau et biomasse microbienne globale) n'est cependant pas toujours évident à montrer et varie selon la pratique culturale, le type de produit organique, le type de sol et les saisons.

Un autre des enseignements majeurs que l'on peut tirer des travaux réalisés concerne la modélisation de la dynamique de la stabilité structurale suite à la décomposition d'un produit in situ. Alors que pendant la phase active de la décomposition des résidus de culture, la modulation de cette dynamique par la prise en considération de fonctions de température, d'humidité et de disponibilité en azote issues des modèles de décomposition de la matière organique se justifie, ce n'est plus le cas lorsque cette phase est passée. Les effets de chacun de ces facteurs sont plus complexes et leur prise en compte dans la modélisation nécessitent encore quelques travaux.

Nous avons mis en évidence l'effet positif, et non le contraire, d'une limitation en azote sur la stabilité structurale notamment après la phase de décomposition active de résidus de culture mais aussi au cours d'un cycle cultural. Nous avons également observé que les variations saisonnières de la stabilité structurales étaient négativement corrélées à celles de la teneur en eau du sol.

Les résultats sont majoritairement issus d'études mono ou bi-factorielles. Or l'étude menée à l'échelle régionale, en couvrant une diversité de systèmes de cultures tels que pratiqués par les agriculteurs, suggère que la réalité est plus complexe. Le système de culture dans son ensemble, par le choix des successions culturales et la combinaison des pratiques qui le caractérise, a un poids important sur les niveaux de stabilité structurale. Les pratiques de gestion organique des parcelles qui visent à améliorer cette propriété doivent être raisonnées par grand type de système de cultures.

VI. Perspectives

Un enjeu majeur qui s'inscrit dans l'ensemble des perspectives de recherches est la prise en compte de l'effet de la diversité des combinaisons de pratiques culturales, des successions de cultures et des facteurs caractérisant les états du milieu sur la dynamique des matières organiques et les processus associés d'agrégation et de stabilisation de la structure du sol. Un autre enjeu important est l'intégration des connaissances permettant d'aborder à la fois cette complexité des systèmes de cultures et la multifonctionnalité des sols. Cela passera par l'intégration des travaux réalisés au sein de l'équipe MO SOL mais aussi conduits pas d'autres partenaires dans des projets tels que MOSAIC et SUSTAIN. La réponse de la matière organique du sol (MOS) et des propriétés associées aux changements climatiques et aux évolutions des systèmes de cultures n'est, en effet, pas complètement élucidée (Trumbore et Czimczick, 2008). Le besoin d'identification, de hiérarchisation et de couplage des processus et de leurs possibles interactions, dans le temps et dans l'espace est renforcé. Ainsi, je souhaite poursuivre mes recherches aux trois échelles d'étude que sont le (I) microcosme, (II) l'essai agronomique, (III) le paysage dont l'échelle spatiale est le petit bassin versant, pour nourrir en collaboration avec mes collègues de MO-SOL et mes partenaires des approches de modélisation à la fois prédictive et adaptée aux situations vers lesquelles nos systèmes vont évoluer. Les modèles mécanistes ne sont pas utilisables, en l'état, pour réaliser des simulations de prédiction d'évolutions. En effet, souvent utilisés pour tester des hypothèses, ils nécessitent un calage préalable des paramètres par optimisation sur des données expérimentales, qu'il faut acquérir, avant de procéder à des simulations de scénarios.

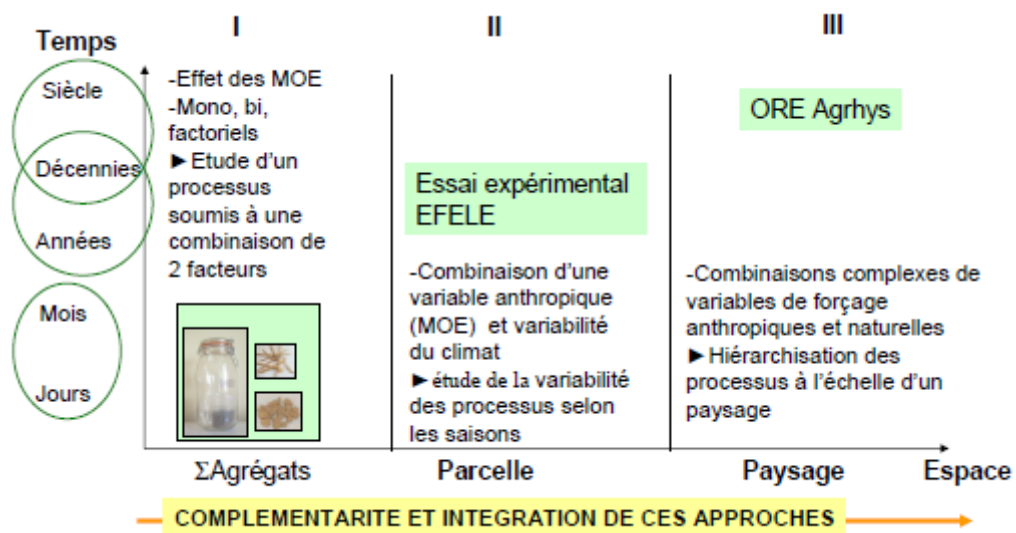


Figure 26. Intégration des recherches aux différentes échelles de temps et d'espace (Projet MO-SOL).

Dans les années à venir, les suivis expérimentaux seront principalement réalisés sur le site du SOERE PRO « EFELE » et de l'ORE « AGRHYS ».

La plateforme expérimentale « EFELE » fait partie du réseau de sites expérimentaux au champ d'observations détaillées et de longue durée sur l'étude des effets de PRO (Produits Résiduaire Organiques) en grandes cultures. Parmi les objectifs du SOERE PRO, sous la

responsabilité de Sabine Houot (UMR EGC), on retrouve l'étude de l'effet des apports de PRO sur la dynamique et la qualité de la MO dans les sols et sur le fonctionnement physique, chimique et biologique ainsi que sur les services écosystémiques. Sur EFELE, différents effluents d'élevage bruts, compostés et issus de la méthanisation sont étudiés dont un est combiné à deux modalités de travail du sol. La plateforme est équipée de lysimètres, de sondes TDR, de tensiomètres et de capteurs de températures, permettant d'enregistrer en continu la température du sol, les flux d'eau et d'éléments chimiques. Nous avons vu l'importance d'une bonne connaissance de ces paramètres pour comprendre les variations saisonnières de la stabilité structurale. Elle est gérée par notre UMR (Responsable T. Morvan) et un grand nombre de partenaires (UMR EGC, Ecobio, Pessac, Géosciences, Irstea Rennes, Genosol) interviennent de manière concertée.

L'ORE « AGRHYS » fait partie du SOERE « Réseau de Bassins Versants de Recherche ». Il est géré par l'UMR SAS en partenariat avec l'UMR Géosciences ainsi que d'autres équipes de l'OSUR. Ce site est représentatif de l'agriculture mixte de l'Europe de l'Ouest. On y retrouve différentes formes d'élevage (exploitations porcines, bovines, ateliers avicoles), différents systèmes de culture (prairies permanentes, cultures légumières spécialisées, cultures fourragères). Les restitutions organiques sont importantes et diversifiées en qualité. Les sols varient surtout par leur position topographique et donc leur régime hydrique et leur teneur en matière organique. Ce site est particulièrement bien renseigné, instrumenté, et très étudié depuis de nombreuses années par différents partenaires.

Les échelles d'approche I et II permettront, dans un proche avenir, de faire évoluer le modèle POULOUUD vers une validation à partir de données acquises, cette fois au champ. L'échelle II, plus spécifiquement permettra de poursuivre la question de recherche sur l'effet cumulé des apports organiques, selon leur composition biochimique, sur la stabilité structurale. Elle permettra de mener des approches multicritères où les mesures de stabilité structurale seront confrontées à d'autres propriétés du sol. L'échelle III permettra d'alimenter deux démarches de modélisation plus complexes : l'une prenant mieux en compte les interactions entre la dynamique des agrégats et celle de la matière organique du sol et une autre prenant en compte la diversité des microorganismes du sol et leur rôle sur la dynamique des MOS. L'une et l'autre ne répondent pas aux mêmes questions de recherche. Cette échelle III permettra également de faire émerger de nouvelles questions scientifiques à aborder à l'échelle I. Un enjeu méthodologique concerne d'une part la réussite de l'intégration des résultats aux différentes échelles de temps et d'espace (figure 26) et, d'autre part, l'appropriation d'approches statistiques multidimensionnelles relevant du domaine de l'écologie.

Je détaille ici les perspectives à court terme (dans les deux années à venir), qui me sont propres, sachant qu'elles sont intimement liées à celles de l'équipe MO-SOL. En effet, il apparaît clairement que je suis arrivée à une étape où mes travaux de recherches doivent s'intégrer dans une approche multi-disciplinaires, en collaboration étroite avec des collègues de MO-SOL, des deux autres équipes de l'UMR (ASAE et Agrohydro) et de partenaires extérieurs.

VI.1. Validation et généralisation du modèle Pouloud et couplage avec un modèle de compostage

Thèse de Jérémy Dénès (Co-encadrement avec Anne Trémier (UR Gere, Irstea¹⁰) et Suzelle Barrington, Directrice de la thèse) (article en cours de finalisation pour soumission prochaine)

Collaboration avec Patricia Garnier (UMR EGC) et Samuel Abiven (Université de Zurich)

Programme de recherches : REACTIF ETYC

Cette perspective, à échéance très proche, est proposée dans le prolongement des travaux de Samuel Abiven aboutissant à la proposition d'un modèle de dynamique de la stabilité structurale à partir de la connaissance des caractéristiques biochimiques (Van Soest) des produits organiques. L'intérêt, comme évoqué précédemment, est de pouvoir prédire leur capacité intrinsèque à améliorer la stabilité structurale. Je présente, ici, les résultats acquis dans le cadre de la thèse de Jérémy Dénès dans cette partie car un travail supplémentaire de réflexion doit être mené avant de finaliser la publication sur le modèle Pouloud. La Chaire d'excellence, qui a permis l'accueil de Suzelle Barrington et qui a été portée à AO par Christian Walter, a été le cadre de la thèse réalisée par Jérémy Dénès, dont l'encadrement a été assuré en collaboration avec l'Irstea de Rennes. Cette collaboration a été à l'origine de la réponse à l'appel d'offre Reactif de l'Ademe et la proposition du projet ETYC portant sur l'évaluation environnementale comparative des filières de compostage et de méthanisation de produits d'origine agricole et urbaine à différentes échelles spatiales (du microcosme et pilote de compostage à l'exploitation agricole).

Les procédés de traitement par compostage et méthanisation se développent et les produits issus de ces transformations sont valorisés pour entretenir l'état organique des parcelles agricoles. Il s'agit d'aborder la filière de compostage depuis le procédé de transformation jusqu'à la valorisation agronomique du produit transformé dans les sols. L'objectif ici est de coupler une approche de modélisation de procédé de compostage avec un ou plusieurs modèles agronomiques. Le couplage des modèles passe ici par la mise en correspondance des sorties du modèle de compostage avec les entrées du modèle agronomique. Dans notre cas, il s'agit des caractéristiques biochimiques des produits, lesquelles déterminent leur comportement dans les sols. Les simulations issues du couplage de ces modélisations doivent permettre de prédire, au-delà des normes réglementaires existantes, les conditions de traitement qui optimisent les finalités agronomiques visées, tout en ayant un bilan environnemental global favorable. Or, aujourd'hui les modèles de compostage d'une part et agronomique, d'autre part, sont basés sur une compartimentation de la matière organique correspondant à une réalité biophysique mais qui, dans les faits, est obtenue par optimisation sur des données expérimentales de flux respirométriques d'une part, de minéralisation du carbone et de l'azote d'autre part. Segoli et al. (2013) font le même constat : les différents compartiments de matière organique portent un nom qui fait référence à un type de fractionnement (chimique ou physique) mais il n'existe pas, concrètement, de méthodes d'analyse permettant de manière satisfaisante et directe de les renseigner. Ce qui constitue un réel frein au couplage de ces deux catégories de modèles. L'enjeu majeur est donc pour les différents modèles (i) de tenter ce renseignement analytique des compartiments de la matière organique en entrée des modèles et (ii) d'aboutir à un jeu de

¹⁰ UR Gere : Unité de Recherche Gestion environnementale et traitement biologique des déchets (Irstea, Rennes)

paramètres uniques pour l'ensemble des produits étudiés afin de pouvoir les utiliser dans un but prédictif.

Jérémy Dénès, encadré pour cette partie du travail par Anne Trémier, a proposé un module de biodégradation de la matière organique en compostage permettant de prédire l'évolution des caractéristiques biochimiques lors du procédé et donc de prédire, ces mêmes caractéristiques en sortie de compostage (Publication N°2). Le but est d'utiliser ces informations pour renseigner les entrées du modèle Pouloud.

Avant de réaliser ce couplage, un travail de validation et de généralisation du modèle Pouloud à une gamme plus large de produits que celle mobilisée pour le développer est apparu nécessaire. Nous avons rassemblé des données, issues de la littérature, obtenues dans des conditions expérimentales similaires aux nôtres (Cosentino et al., 2006; Annabi et al, 2007; Le Guillou et al., non publié), permettant de couvrir une diversité de produits de caractéristiques biochimiques issues du fractionnement Van Soest contrastées (figure 27), que l'on a complété par de nouvelles données, acquises dans le cadre de masters (Delphine Clugnac et Archange Uwantegé). L'ensemble a permis de disposer d'une base, au final, constituée de données issues de 27 produits diversifiés (résidus de cultures (4), fumiers (6), lisier de porcs (2), composts matures et immatures (10), digestats (3), composts de digestats (2)) dont la décomposition est étudiée dans des sols de texture limoneuse, de teneurs en matières organiques relativement proches les unes des autres.

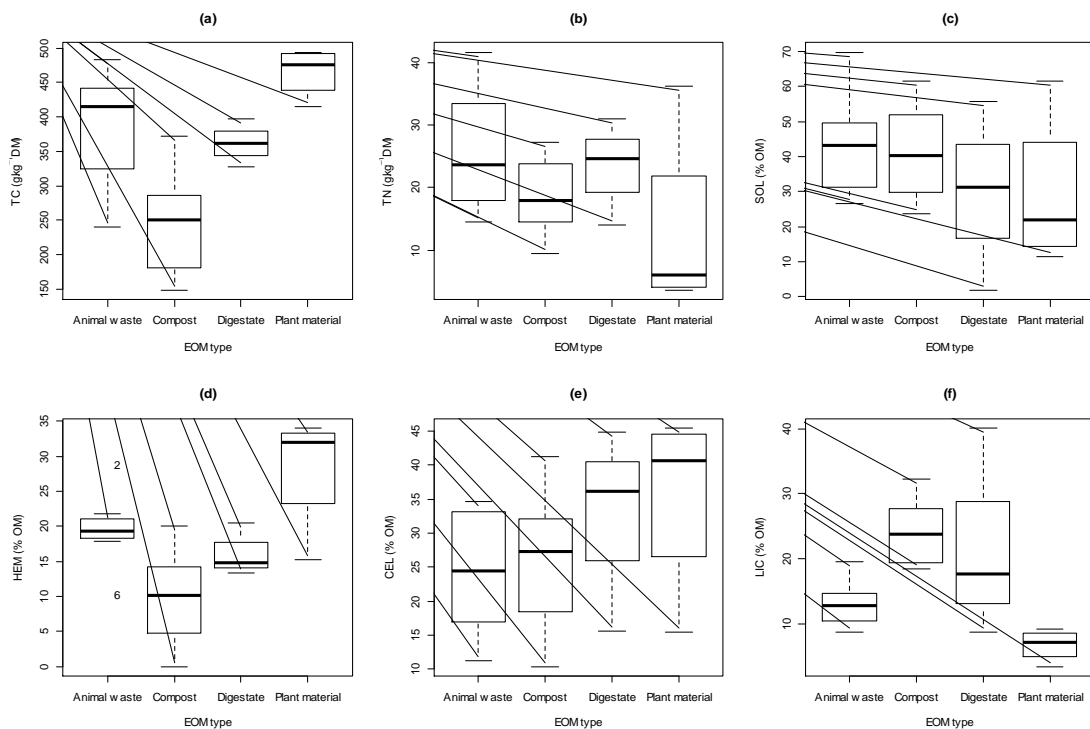


Figure 27. Distribution des caractéristiques biochimiques des produits organiques par famille de produits (effluents d'élevage bruts, composts, digestats, résidus de cultures).

Nous avons d'abord vérifié que toutes les cinétiques décrivant la dynamique de la stabilité structurale suivaient une loi log-normale (figure 28). Puis, nous avons procédé à une nouvelle mise en relation des paramètres A, B et C de cette loi avec les caractéristiques biochimiques de l'ensemble des produits. Une nouvelle approche statistique a été adoptée, la régression des

moindres carrés partiels (PLS) qui emprunte sa démarche à la fois à l'analyse en composante principale et à la régression et permet ainsi de tenir compte du caractère interdépendant des 3 paramètres (Wold et al., 2001).

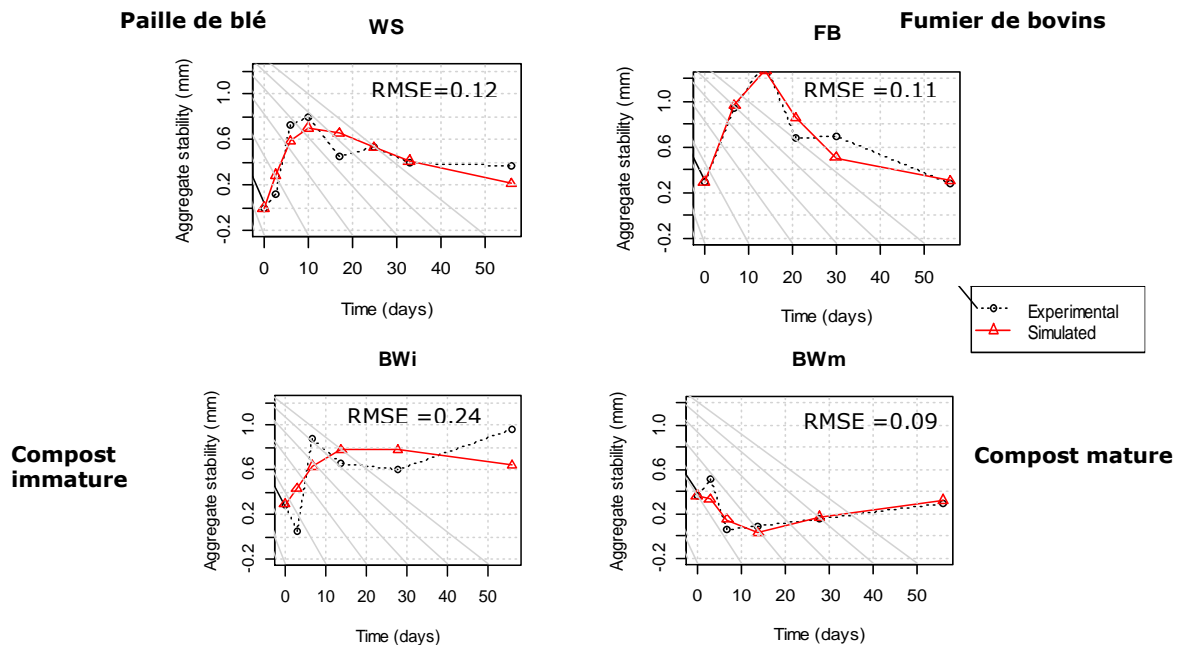


Figure 28. Application de la loi Log-normale à une variété de produits organiques (Dénès et al., communication orale à Ramiran, 2013)

Les premiers résultats confirment que le paramètre A (amplitude de l'effet) de la loi log-normale (équation (a), p. 38) est bien inversement relié à la teneur en lignine des produits. Par contre, aucune relation statistique satisfaisante n'a été trouvée entre les paramètres B et C et les caractéristiques biochimiques des produits considérés. Particulièrement, la fraction soluble n'est pas corrélée à la dynamique de la stabilité structurale. Cette fraction soluble issue de la méthode Van Soest est reconnue comme étant représentative de la biodégradabilité des résidus de cultures (Trinsoutrot et al., 2000), peu corrélée à la minéralisation du carbone des effluents d'élevage (Morvan et al., 2006) et récalcitrante dans les composts (Peltre et al., 2010).

Nous avons deux suites possibles à ce travail. La première consiste à poursuivre sur la base de la mobilisation des données biochimiques, en, éventuellement, procédant par grande famille de produits jusqu'à trouver une solution satisfaisante. Cela sera favorisé par les travaux menés par nos partenaires du programme ETYC, nos partenaires (UMR EGC, UR LBE¹¹) qui visent à mieux caractériser la fraction soluble Van Soest pour une large gamme de produits bruts et transformés. La seconde rejoindrait l'alternative proposée par Samuel Abiven (2004), dans sa thèse, qui est le couplage de la même équation (a) avec la minéralisation du carbone, en mettant en relation cette fois les paramètres de l'équation avec les valeurs remarquables des courbes de minéralisation du carbone. En effet, Helfrich et al. (2008) ont montré que l'activité microbienne est un mécanisme crucial de la formation et stabilisation des agrégats. De Gryze et al. (2005) ont proposé un modèle de formation des agrégats proportionnelle au taux de respiration.

¹¹ LBE : Laboratoire de Biotechnologie et Environnement (Narbonne)

Dans le cadre de la thèse de Jérémy, le travail de calibration du modèle Cantis (Garnier et al., 2003, Chalhoub et al., 2013) a déjà été réalisé pour prédire correctement les cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote de certains produits, Cantis ayant été considéré comme un modèle agronomique intéressant à étudier en tant que tel. Les informations concernant les caractéristiques biochimiques prédites par le modèle de compostage ont été utilisées pour renseigner les compartiments initiaux décrivant la matière organique entrante (FOM) de Cantis. Le paramétrage a été réalisé en s'inspirant des précédents travaux et en optimisant la constante de dégradation des différents compartiments de manière à obtenir un même jeu de paramètres pour l'ensemble des produits qui permette une simulation satisfaisante des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote. L'analyse détaillée de ce travail a fait l'objet d'une publication (N°1 dans la liste). Bien que des améliorations soient encore à apporter, il est possible d'envisager le couplage des courbes de minéralisation prédites par Cantis avec le modèle Pouloud. Ainsi le modèle Cantis serait un modèle intermédiaire entre le modèle de compostage et le modèle Pouloud. Cosentino (2006) avait déjà proposé un modèle Cantis-STAB permettant de prédire la dynamique de la stabilité structurale à partir de la dynamique de biomasse microbienne prédite par Cantis, via une régression linéaire établie entre la stabilité structurale et la biomasse microbienne par l'auteur. Il s'avère que nos travaux ne nous ont pas permis de mettre en évidence une telle relation.

D'une manière générale, il est clair qu'une telle démarche de couplage soulève la question de la prise en compte de la propagation des incertitudes liées à chaque maillon de modélisation. C'est une question de recherche en soit qui dépasse le cadre de mon projet et mobilise toute l'UMR. Mais ce type d'approche est motivante et répond typiquement à la demande des industriels. Elle pourra être développée dans le cadre des collaborations déjà établies dans le projet ETYC et que l'on continuera à valoriser au sein de la plateforme APIVALE. Cette plateforme associe l'IRSTEA de Rennes, l'INRA de Rennes (UMR PEGASE¹² et UMR SAS), l'ANSES de Ploufragan et l'UBS LimatB. La finalité est de structurer les recherches menées par les partenaires autour d'une Approche intégrée de filière de valorisation des effluents organiques, depuis l'aliment des animaux jusqu'à la valorisation agronomique au champ des effluents bruts ou transformés en passant par le stockage et la transformation de ces effluents. Je me suis investie dans l'animation de cette plateforme pour le volet agronomique.

VI.2. Vers une meilleure prise en compte des facteurs abiotiques et biotiques et de leurs interactions, y compris dans des approches de modélisation

VI.2.1. Rôle du régime hydrique sur la dynamique de l'agrégation

Ici, il s'agit, pour moi, d'initier une nouvelle question de recherche, dans le cadre du projet MOSAIC. Ce travail fait l'objet d'une collaboration étroite avec Cornelia Rumpel (UMR BiomCo) qui prend en charge la caractérisation chimique des différentes formes de carbone.

Dans un contexte de changement global, la matière organique du sol est un élément clé de la résilience et de la durabilité des agroécosystèmes (van Apeldoorn et al., 2011). La matière organique, en impactant la fonction de production et les fonctions environnementales, est une composante importante de la fertilité des sols. En contexte agricole, la stabilisation et la

¹² UMR PEGASE : Physiologie, Environnement et Génétique pour l'animal et les systèmes d'élevage (Rennes)

dynamique du carbone sont intimement liés à l'agrégation (Tisdall et al., 1982 ; Puget et al., 2000 ; Chenu et al., 2000). L'agrégation du sol est un phénomène complexe par lequel les interactions entre particules minérales et organiques conduisent à la stabilisation de la structure mais également à la stabilisation des matières organiques par mécanisme de *feedback*, et induisent ainsi la séquestration du carbone du sol (Angers et Chenu, 1997, Six et al., 2000a). Nous avons par ailleurs montré l'importance du régime hydrique sur la dynamique de la stabilité structurale. Le projet MOSAIC développé dans le contexte du bassin versant de Naizin (56) est le cadre propice pour étudier l'effet des interactions entre restitutions importantes de matière organique au sol et régime hydrique sur les processus d'agrégation et de stabilisation de la matière organique. C'est alors également l'occasion d'étudier le rôle des processus d'agrégation et de stabilisation dans la protection des matières organiques vis-à-vis de la dégradation permettant ainsi une meilleure efficacité du stockage du carbone dans les sols. Ce sera pour moi l'occasion d'étudier plus finement les mécanismes d'agrégation grâce à des analyses fines du carbone dans les différentes tailles d'agrégats. Nous avons alors mis en œuvre un nouveau protocole de mesure des agrégats stables à l'eau, basé sur les approches d'Elliott (1986) et de Six et al. (2000).

Nous avons commencé par co-encadrer, avec Cornelia Rumpel, le stage de M2 d'Adila Omari. Nous nous sommes particulièrement intéressées à la mise en évidence du processus de stabilisation de la MOS sous système de cultures à fort niveau d'intrants organiques, en différents points d'un transect présentant des régimes hydriques contrastés: des sols bien drainés en haut du transect, des sols très hydromorphes en bas du transect. Le sol drainé est caractérisé par un régime hydrique alternant des phases d'humectation et des phases de dessiccation, plutôt favorable à la déprotection du carbone du sol (Balesdent et al., 2000). Ces cycles, plutôt étudiés en conditions contrôlées de laboratoire, affectent également la dynamique des agrégats (Dénef et al., 2001). Le sol hydromorphe est caractérisé par un état d'engorgement en eau prolongé peu étudié dans la littérature. Ces régimes hydriques affectent également la nature chimique de la matière organique. Ainsi nous avons commencé par réaliser des mesures de quantité d'agrégats stables à l'eau, de répartition du carbone dans ces agrégats, des teneurs en lignines et des suivis de minéralisation du carbone. La suite du travail comportera un caractère dynamique avec plusieurs prélèvements dans l'année et des analyses de ^{13}C et de nanosims pour caractériser le carbone stabilisé au sein des agrégats. Sur le plan des méthodes analytiques à mettre en œuvre, nous nous inspirons, entre autre, des travaux de Six et al. (2001) et de Gryze et al. (2006) ainsi que de Cambardella et al. (2004) qui ont également étudié l'agrégation à l'échelle de transects différenciés au sein d'un bassin versant. Les résultats alimenteront une approche de modélisation de la dynamique de la matière organique associée à celle des agrégats proposée par Segoli et al (2013). En effet, ces auteurs proposent un modèle qui, avec succès, prend, explicitement, en compte le turnover des agrégats et leur influence sur la dynamique de la matière organique. Cette approche prendra en compte l'ensemble du profil afin d'appréhender correctement de potentiel de séquestration du carbone (Rasse et al., 2006).

La suite de ce travail trouvera tout son sens en associant les collègues de l'équipe Agrohydro de l'UMR SAS et de l'UMR Géosciences¹³, qui travaillent sur la dynamique du carbone organique dissous, ainsi que les collègues de MO-SOL qui étudient les flux de CO_2 , sur les mêmes transects. Nous souhaitons faire une demande de bourse de thèse mais il est nécessaire,

¹³ UMR Géosciences : Géologie, Géophysique, Géochimie (Rennes)

en amont, de préciser les hypothèses de recherche et de caler l'approche méthodologique associée. C'est que nous faisons ce printemps 2015.

VI.2.2. Prise en compte des facteurs biotiques

Dans le cadre du travail réalisé dans la thèse de Nicolas Bottinelli, nous n'avons pas fait le lien entre l'activité lombricienne du sol et la dynamique de la stabilité structurale. Nous n'avons pas pu, non plus, mettre en évidence l'effet de la réduction du travail du sol sur l'hydrophobicité des agrégats, en partie du fait des conditions hydriques trop humides et donc peu favorables à la mise en évidence de cet effet. Néanmoins, je pense que c'est une propriété dont il convient de poursuivre l'étude en analysant plus finement le rôle des lombriciens et leur interaction avec la biomasse fongique des sols. En effet la stimulation de la macrofaune et des micro-organismes (particulièrement les champignons) du sol induirait une production de substances hydrophobes (Hallett et Young, 1999 ; Frey et al., 1999 ; Six et al., 2000). Les programmes de recherche MO-TCS et SUSTAIN m'ont permis de réaliser que le contexte des techniques culturales simplifiées était particulièrement propice à ce type d'étude. En effet, Pérès et al. (2013) rappellent qu'il peut y avoir antagonisme entre le développement des communautés lombriciennes et celui des communautés fongiques. Ainsi, les effets positifs connus des lombriciens sur la stabilité structurale peuvent être contrebalancés par des effets négatifs tels que le « priming effect » induisant une consommation des agents agrégeants par les microorganismes du sol et la consommation des racines ou la destruction du réseau d'hyphes mycéliens. Mieux comprendre les facteurs qui gouvernent ces processus est indispensable pour comprendre l'effet des techniques culturales sur la stabilité structurale et ses évolutions saisonnières.

Ce travail sera permis grâce à l'arrivée dans notre équipe de Guenola Pérès qui pourra prendre le relais et développer cette question de recherches. Un protocole de mesure de la longueur des hyphes mycéliens développé au sein de notre laboratoire pourra être valorisé dans ce cadre. Concernant la mesure de l'hydrophobicité des agrégats, des méthodes d'analyses plus précises seront adoptées grâce à une collaboration avec l'unité EPHOR¹⁴. En effet, la mesure du temps de pénétration d'une goutte d'eau dans un agrégat n'est pas appropriée pour la compréhension des processus (Cosentino et al. 2010).

VI.2.3. Intégration de la diversité microbienne dans les approches de modélisation

Cette perspective de recherche est née, d'une part, du modèle conceptuel proposé à l'issue de la thèse de Cédric Le Guillou et d'autre part, du constat que dans un contexte de complexification des systèmes il était important de mieux prendre en compte la diversité microbienne des sols. Une Chaire d'Agriculture Ecologiquement Intensive a été mise en place et nous avons bénéficié dans ce cadre d'une bourse de thèse pour mener les travaux décrits ci-dessous. Il s'agit de la thèse de Benjamin Louis qui a démarré il y a un an, qui est co-encadrée par Valérie Viaud et moi-même sous la direction de Philippe Leterme. Cette perspective est rendue possible grâce à la collaboration étroite avec Pierre Alain Maron (UMR Agroécologie).

Les modèles de dynamique des matières organiques sont très nombreux. Ils ont été pour la plupart construits à partir de chroniques d'observations acquises sur des longues durées, dans des contextes variés de climat, type de sol, systèmes de cultures (Powlson et al., 1996 ; Smith et

¹⁴ EPHOR : Environnement physique de la plante horticole (AO, Angers)

al., 1997 ; Falloon and Smith, 2002). La plupart de ces modèles comportent plusieurs pools de matière organique dont la biomasse microbienne considérée comme une boîte noire avec une dynamique dépendant de la disponibilité du substrat. Ainsi, la biomasse microbienne n'est jamais limitante. Ce sont des modèles dits orientés « matières organiques ». Les facteurs de contrôle de la dynamique de la SOM sont restreints : température, teneur en eau et teneur en argile.

Le changement de communautés microbiennes en réponse aux changements globaux joue un rôle important dans la dynamique de la MOS et les taux de transformation qu'elle suppose. L'accumulation de la matière organique est très dépendante des micro-organismes hétérotrophes responsables de la transformation des entrées en composés complexes et stables (Pascault et al., 2010). L'enjeu est alors de mieux prendre en compte la dimension microbienne des sols dans ces modèles, d'où le développement de modèles orientés « microorganismes ». Ces modèles complexes constituent une bonne base pour une prédiction à court terme. Des ajustements par approximations successives permettent une adaptation de ce type de modélisation sur le long terme (Manzoni et Porporato, 2009).

L'objectif de la thèse est de proposer un modèle intégrant la diversité microbienne qui permettrait une meilleure simulation (i) dans le temps, des effets des changements globaux et (ii) dans l'espace, des interactions entre facteurs et processus occasionnés par ces changements globaux. Ce modèle doit pouvoir être renseigné à partir de la connaissance de la diversité microbienne du sol et être utilisé à titre prédictif pour répondre aux attentes des professionnels qui souhaitent mieux préciser l'évolution du fonctionnement des sols en contexte d'agriculture écologiquement intensive.

Une revue bibliographique exhaustive sur les relations entre (i) diversité microbienne et fonctionnement du sol et (ii) occupations du sol et diversité microbienne, d'une part, et, d'autre part, sur les modèles intégrant cette diversité, a permis de proposer la démarche de travail suivante. Les hypothèses de recherche sont les suivantes :

- La diversité des microorganismes ainsi que la composition des communautés microbiennes ne sont pas neutres concernant la dynamique de matière organique du sol
- Les pratiques agricoles, tout comme le contexte pédoclimatique, ont un impact sur les communautés microbiennes
- Intégrer la diversité microbienne dans des modèles de dynamique de la matière organique améliorera la bonne simulation et la bonne prédiction de l'effet des interactions entre facteurs environnementaux et facteurs anthropiques qui conditionnent les entrées de carbone et d'azote (fertilisations minérale et organique, choix des espèces végétales, gestion des résidus de cultures)
- Les modèles de dynamique des matières organiques intégrant la diversité microbienne sont surtout conceptuels ou peu confrontés aux données expérimentales. Ils sont basés surtout sur une multiplication des compartiments microbiens présentant, par exemple, des affinités spécifiques vis-à-vis du substrat ou de la matière organique des sols, comme les modèles de Moorhead et Sinsabaugh (2006) ou de Perveen et al. (2014). Ils ne peuvent être utilisés, en l'état, pour réaliser des simulations prédictives.

La voie choisie est le couplage d'un modèle mécaniste de dégradation d'un substrat, du type de celui proposé par Nicolardot et al. (2001), avec un modèle statistique mettant en relation les caractéristiques pertinentes de la diversité microbienne et les paramètres de l'équation de décomposition et d'efficacité microbienne. Les étapes de travail sont les suivantes :

- Identifier les caractéristiques des communautés microbiennes (indices de diversité, richesse ou équitabilité) les plus pertinentes pour renseigner sur la dynamique de la matière organique du sol.
- Etablir une méthode d'intégration de ces paramètres dans un modèle de dynamique de la matière organique et évaluer le gain de qualité prédictive du modèle.

Ce travail est réalisé grâce au jeu de données de suivi de minéralisation de résidu de blé mis à disposition par l'unité Agroécologie de l'INRA de Dijon. Brièvement, des échantillons de sol ont été prélevés dans 42 sites de France métropolitaine couvrant une large variabilité de contexte pédologique et trois types d'occupation du sol (forêts, prairies, cultures annuelles). A chacun de ces sols, un résidu de blé a été incorporé et un suivi des émissions de CO₂, mesurant la minéralisation, a été effectué. Le carbone de ce résidu a été marqué pour pouvoir suivre le CO₂ provenant de la minéralisation du résidu de celui provenant de la minéralisation de la matière organique du sol. A ce jeu de données s'ajoute un autre construit de la même manière à partir de 100 sols du bassin versant de Naizin dans le cadre du projet MOSAIC. La variabilité du contexte pédoclimatique est fortement réduite et permet de révéler les relations systèmes de culture-diversité microbienne-fonctionnement du sol.

VI.3. Poids des composantes des systèmes de cultures, dans la variabilité des niveaux de stabilité structurale, selon leur position dans un petit bassin versant

Cette question est traitée dans le cadre du programme MOSAIC, à partir d'une approche développée dans le prolongement du travail présenté dans le chapitre V.3. Il fait l'objet d'une collaboration avec Nouraya Akkal (équipe ASAE) qui a réalisé une typologie fine des systèmes de cultures et construit une base de données détaillée et Valérie Viaud (équipe MO-SOL) pour l'approche spatialisée qu'implique ce type d'étude.

L'étude de l'effet des interactions complexes entre systèmes de cultures et facteurs du milieu sur les processus qui nous intéressent, ne peut se faire raisonnablement sur la base d'expérimentations contrôlées à plus de deux facteurs. Le travail réalisé pendant ma délégation présentait une limite liée à l'étendue de la zone. Cette limite est levée en adoptant la même démarche sur un BV plus restreint et plus homogène en terme de climat, c'est sûr, mais de types de sol également. Les systèmes de cultures diversifiés sur ce territoire impliquent une diversité de situation en terme d'entrées de carbone dans le sol et de fait, de dynamiques des matières organiques (Kaur et al., 2008). La proposition d'un plan d'échantillonnage statistiquement raisonné a été faite par Benjamin Louis, alors en CDD dans notre équipe sur le programme MOSAIC. L'échantillonnage comprenant 200 prélèvements a été réalisé en juin 2013, à une date suffisamment éloignée (deux mois) des dernières pratiques de travail du sol et d'épandage. Sur tous les échantillons, des analyses conjointes de sols, de teneur en carbone et de stabilité structurale ont été réalisées. Des analyses de diversité microbienne ont également été réalisées par les partenaires de l'UMR Agroécologie. Sur chaque parcelle échantillonnée, l'historique est bien connu et le système de cultures caractérisé en terme d'entrées de carbone, de formes de carbone, de nombre d'opérations culturales, de fertilisation azotée. Ces informations sont confrontées aux stabilités structurales par des approches multi-variées et spatialisées. Je m'inspire, entre autre, des travaux de Shukla et al. (2003, 2006). L'objectif est de mettre en évidence les poids respectifs des

systèmes de cultures et des facteurs environnementaux sur la valeur de la stabilité structurale, en différents points du paysage.

Cette étude est en cours et permettra par ailleurs de cerner les combinaisons entre composantes de ces systèmes de cultures et facteurs environnementaux, d'intérêt, qu'il conviendrait d'étudier à l'échelle des processus.

VI.4. Evaluation de la qualité du sol et des fonctions qu'il assure sous différents systèmes de cultures

Il s'agit d'une perspective proposée dans des réponses à des appels d'offres, « ANR » porté par Christian Walter, qui a été déposé et « H2020 », porté par l'université polytechnique de Cartagena (Espagne) qui sera prochainement déposé.

Les travaux que je mène sur l'effet de l'apport de produits organiques sur la stabilité structurale du sol doivent s'inscrire maintenant dans une démarche globale de caractérisation du fonctionnement du sol. La contribution des pratiques agricoles étudiées, aux services écosystémiques que les sols doivent assurer, doit être précisée.

Nous avons, en effet, mené dans le cadre du PRIR, de SUSTAIN et continuons à mener dans le cadre du dispositif EFELE des études synchrones sur les processus physiques, biologiques, chimiques dont les résultats sont analysés de manière cloisonnée. A cela s'ajoute, des informations acquises selon les mêmes méthodes dans des réseaux de parcelles dans le cadre de nombreux projets, constituant un potentiel de données de références significatif permettant une évaluation de la qualité du sol sous les systèmes de cultures actuellement pratiqués et ceux qui seront proposés dans le futur. L'évolution des systèmes de production encouragée par les différentes politiques nationale et européenne nécessite que l'on dispose d'outils d'évaluation des systèmes de cultures vis-à-vis des services éco-systémiques des sols. Cela passe par le développement d'indicateurs, dont des indicateurs agrégés (Glover, 2000) de la qualité des sols impliquant plusieurs propriétés du sol (chimiques, physiques et biologiques) reconnues comme étant elles-mêmes des bons indicateurs et réparties de manière pertinente suivant les services étudiés (Karlen, 1994 ; Kang, 2005).

Plusieurs aspects sous-tendent cette question. Une pratique agricole peut avoir des effets inverses lorsque l'on considère plusieurs propriétés et processus. La contribution d'une propriété dans un processus et in-fine une fonction doit être bien identifiée. Des seuils pour chacune des propriétés du sol doivent être proposés pour pouvoir évaluer le fonctionnement du sol.

Le cadre de l'expertise Esco, et le travail bibliographique que j'ai réalisé sur l'impact des Mafor sur les propriétés physiques des sols m'a fait prendre conscience de la nécessaire approche multicritères, y compris lorsque l'on se limite aux propriétés physiques des sols. En effet, le besoin que pourrait ressentir un agriculteur à améliorer une propriété plutôt qu'une autre dépend étroitement du type de sols et du système de cultures. Le choix de la Mafor pour répondre à son objectif va en dépendre et pourrait avoir des effets non souhaités puisque les différentes propriétés physiques des sols sont étroitement liées les unes aux autres. Une première tentative de synthèse bibliographique est proposée dans la figure 29. Par exemple, l'apport répété de certains fumiers peut conduire à l'accumulation de substances répulsives dans les sols induisant une amélioration de la stabilité des agrégats du fait de la résistance à l'éclatement qu'elles confèrent

aux agrégats en diminuant la vitesse de pénétration de l'eau dans les agrégats. En revanche, une diminution de la conductivité hydraulique, de la porosité et de la capacité de rétention en eau du sol peut être observée en même temps. Ainsi, nous devons continuer à travailler sur les processus, avec des outils et des approches plus innovantes. Il faudra notamment mieux caractériser la matière organique des produits étudiés mais aussi du sol. La caractérisation de la matière organique du sol devra comprendre l'analyse des formes labiles, récalcitrantes et hydrophobes. Cela pourra être réalisé en partenariat avec les UMR Ecobio, Géosciences, BiomCo, EGC.

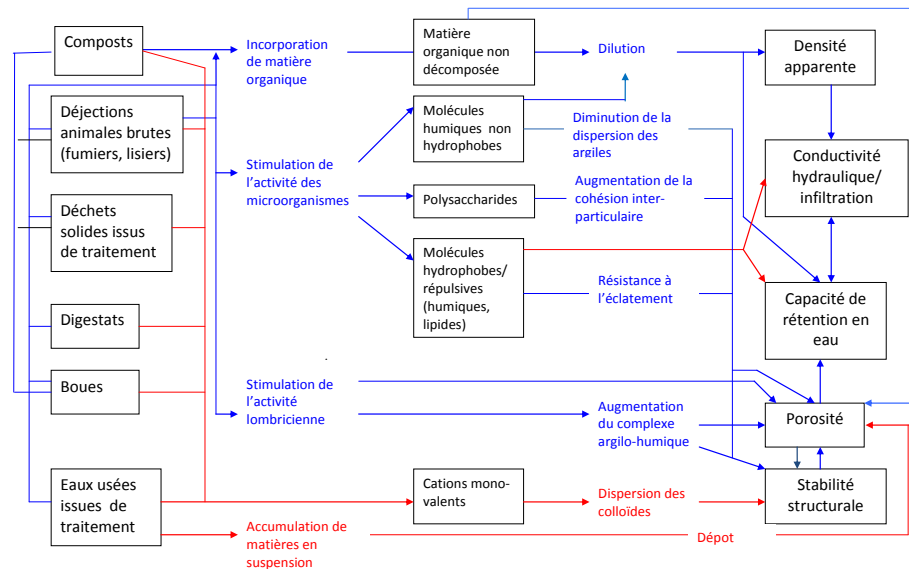


Figure 29. Synthèse des principaux processus par lesquels les grandes familles de Mafor impactent les propriétés physiques des sols qui les reçoivent. L'intensité de ces effets est modulée par le degré de stabilité de la Mafor et le type de sol (texture et type d'argile). Certains de ces processus sont temporaires, lorsqu'ils sont liés à une forme de matière organique labile, facilement décomposable, et d'autres, liés à une matière organique stable, se mettent en place sur le long terme. Les flèches en bleu représentent des effets positifs et en rouge, des effets négatifs. (modifié de S. Menasseri, 2014, rapport final de l'expertise Esco)

Dans le cadre du PRIR et plus précisément du stage de master d'Emilie Thiot nous avons proposé, à travers une étude bibliographique, un cadre méthodologique. Il comprend tout d'abord la définition des relations propriétés du sol d'intérêt – mécanismes – fonctions du sol. Ces propriétés ayant des grandeurs différentes doivent subir une transformation avant de les agréger dans une approche globale. En nous inspirant des travaux de Karlen et Stott (1994), Andrews (2002) et Masto (2008) nous avons initié une réflexion sur:

- le choix des courbes (figure 30) et la définition des valeurs des seuils adaptées à notre contexte pédologique, climatique et de systèmes de cultures, à introduire dans une démarche de notification des indicateurs de la qualité des sols sur la base de laquelle nos résultats acquis seront transformés. Les valeurs seuils seront déterminées en mobilisant les informations dont nous disposons mais aussi celles réunies dans les bases de données du GIS (2011) et des résultats issus de la littérature. La présence de Blandine Lemerrier au sein de l'équipe MO-SOL, fortement impliquée dans ce GIS, nous aide dans cette démarche.

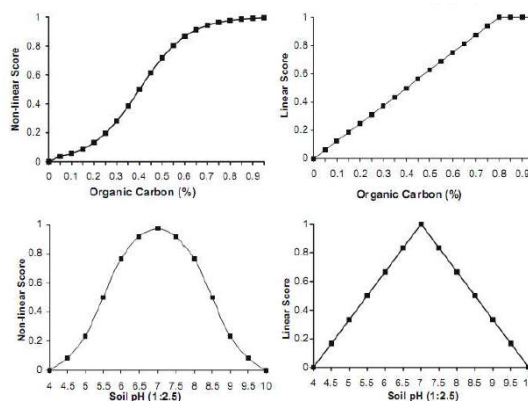


Figure 30. Exemples de fonctions de score linéaires et non linéaires pour deux types d'indicateurs (Masto, 2008).

- l'agrégation des notes affectées aux différentes propriétés concernées par un processus, afin d'identifier leur contribution dans le processus puis la fonction. Par exemple, la fonction du sol à résister à l'érosion est dépendante du processus de stabilisation du sol (stabilité structurale) qui lui-même est relié à des indicateurs comme la biomasse microbienne.

Une fois ce cadre méthodologique finalisé, nous pourrons l'appliquer aux données acquises sur les propriétés physiques (stabilité structurale, conductivité hydraulique, capacité de rétention en eau, porosité), chimiques et biogéochimiques (stocks de carbone, minéralisation de l'azote et du carbone) et biologiques (biomasses microbiennes, macrofaune du sol) au sein de l'équipe MO-SOL et en partenariat avec d'autres équipes de recherche et les confronter aux services écosystémiques rendus par le sol, d'approvisionnement (production agricole), de régulation (qualité de l'eau, populations biologiques, émissions de gaz à effet de serre, séquestration de carbone) et d'auto-entretien (régulation des flux d'érosion). Cela pourra être pris en charge par un post-doctorant ayant déjà des compétences dans ce domaine.

VII. Conclusion

En conclusion, l'objectif finalisé de mes travaux de recherche est la contribution à l'évaluation de systèmes de cultures vis-à-vis de leur effet sur les fonctions et les services écosystémiques des sols et l'optimisation du recyclage des produits organiques. L'année 2015 sera l'année de la finalisation des publications des travaux anciens et plus récents, du bilan du programme ETYC et de la contribution aux réponses aux appels d'offre ANR et H2020. C'est aussi l'année du bilan de l'UMR et donc de l'équipe MO-SOL, que j'anime, et de la proposition dans la prolongation, d'un nouveau projet. Ma candidature à soutenir une HDR fait partie de l'engagement de l'équipe, lors de l'évaluation AERES de 2010, à augmenter le nombre d'HDR, actuellement de 2 pour 9 scientifiques. Cette reconnaissance est nécessaire pour augmenter le nombre de thèses dans notre équipe et assurer le portage de projets notamment internationaux. Mes travaux concernent l'axe de la compréhension et de la modélisation des effets des interactions « pratiques-milieu » sur les processus de notre projet d'équipe. Ils portent sur l'analyse et la compréhension des interactions entre processus et facteurs et l'intégration des informations dans des approches multifactorielles. Il n'est pas toujours évident de mener les deux de front, mais c'est une richesse qu'il faut réussir à valoriser.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abiven S., S. Menasseri, C. Chenu. 2009. How organic inputs have an effect on soil aggregate stability: a review. *Soil Biol Biochem*, 41, 1-12.
- Abiven S., S. Menasseri, D. A. Angers et P. Leterme. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *Eur. J. of Soil Sci*, 58, 239-247.
- Abiven S., S. Menasseri, D. A. Angers et P. Leterme. 2008. A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Sci Am J*, 72, 119-125.
- Acton C.J., D.A. Rennie, E.A. Paul. 1963. The relationship of polysaccharides to soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science* 43, 201-209
- Akkal-Corfini N., T. Morvan, S. Menasseri-Aubry, C. Bissuel-Bélaygue, D. Poulain, F. Orsini. 2009. Nitrogen mineralization, plant uptake and nitrate leaching following the incorporation of (¹⁵N)-labeled cauliflower crop residues (*brassica oleracea*) into the soil: A 3-year lysimeter study. *Plant and Soil*, 328, 17-26
- Álvaro-Fuentes J., J.L. Arrúe, R. Gracia, M.V. López. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma*, 145, 390-396.
- Amelung W. 2001. Methods using amino sugars as markers for microbial residues in soils. In: *Assessment methods for soil carbon* (eds R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett & B.A. Stewart), pp. 233–272. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Amezetka A. 1999. Soil aggregate stability : review. *Journal of sustainable agriculture*, 14, 82-151.
- Amougou, N. 2011. Importance des litières de *Miscanthus × giganteus* (feuilles sénescentes, racines et rhizomes) : impact de leur décomposition sur la minéralisation de C et N dans un sol. Thèse de Doctorat. Université de Reims Champagne-Ardennes. 177 p.
- Andrews S S, DL Karlen, JP Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 90, 25-45.
- Angers D.A., J. Caron. 1998. Plant-induced changes in soil structure : processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42, 55-72.
- Angers D.A., M.S. Bullock., G.R. Mehuys.. 2008. Aggregate stability to water. In: *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd edn (eds M.R. Carter & E.G. Gregorich), pp. 811–820. CRC Press, Boca Raton, FL. Angers D.A., Caron, J. 1998. Plant-induced changes in soil structure ; processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 45, 55-72.
- Angers D.A., N. Bissonnette, A. Légère, N. Samson. 1993a. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.*, 73,: 39-50.
- Angers D.A., C. Chenu. 1997. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. Ch. 14. In R. Lal et al. (Ed.) *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Raton Fl. Pp 199-206
- Angers, D.A., Caron, J., 1998. Plant-induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks. *Biogeochemistry* 42, 55-72.
- Annabi M., S. Houot, C. Francou, M. Poitrenaud, Y. Le Bissonnais 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc Am J*. 71, 413-423
- Arrouays D., N. Saby, C. Walter, B. Lemerrier, C. Schvartz. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*, 22, 48–51.
- Avnimelech Y., A. Cohen. 1989. Use of organic manures for amendment of compacted clay soils II. Effect of carbon to nitrogen ratio. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 20, 1635-1644.
- Bissonnette N., D.A. Angers, R.R. Simard, J. Lafond. 2001. Interactive effects of management practises on water-stable aggregation and organic matter of a humic Gleysol. *Can. J of Soil Sci.*, 545-551.
- Blackman, J.D. 1992. Seasonal variation in the aggregate stability of downland soils. *Soil use and management*, 8,142-150.
- Blair N., R.D. Faulkner, A.R. Till, P.R. Poulton. 2006. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility - Part 1: Broadbalk experiment. *Soil & Tillage Research*, 91, 30-38.
- Blanchart E., A. Bruand, P. Lavelle. 1993. The physical structure of cast of *Millsonia anomala* (Oligochaeta: Megascolecidae) in shrub savanna soils (Côte d'Ivoire). *Geoderma*, 56, 119–132.

- Blanco-Canqui H. 2010. Does no-till farming induce water repellency to soils ? *Soil use and management*, 27, 2-9.
- Blanco-Canqui H., R. Lal. 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*, 149, 171–180.
- Blanco-Canqui H., R. Lal. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil Tillage Research*, 95, 240-254.
- Böhme L. and F. Böhme. 2006. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilisation. *European J. of Soil Biology*, 42, 1-12.
- Bossuyt H., K. Deneff, J. Six, S.D. Frey, R. Merckx, K. Paustian. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 16, 195-208.
- Bottinelli, N., V. Hallaire, S. Menasseri-Aubry, C. Le Guillou, D. Cluzeau 2010. Abundance and stability of belowground earthworm casts influenced by tillage intensity and depth. *Soil and Tillage Research*, 106, 263-267
- Bronick C.J., R. Lal 2005. Manuring and rotation effects on soil carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil&Tillage Research* 81, 239-252.
- Bruckert S. 1979. Analyse des complexes organo-minéraux des sols. In: *Pédologie 2. Constituants et Propriétés Du Sol* (eds M. Bonneau& B. Souchier), pp. 187–209. Masson, Paris.
- Butenshoen O., C. Poll, R. Langel, E. Kandler, S. Marhan, S. Scheu. 2007. Endogenic earthworms alter carbon translocation by fungi at the soil-litter interface. *Soil Biol Biochem*, 39, 2854-2864.
- Calbrix R., S. Barray, O Chabrierie., L. Fourrie., K Laval. 2007 Impact of organic amendments on the dynamics of soil microbial biomass and bacterial communities in cultivated land. *Appl Soil Ecol*, 35, 511-522.
- Cambardella C.A., T.B. Moorman, S.S. Andrews, D.L. Karlen. 2004. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. *Soil and Tillage research*, 78, 237-247.
- Cambardella C.A., T.B. Moorman, S.S. Andrews, D.L. Karlen. 2004. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. *Soil & Tillage Research*, 78, 237–247.
- Caravaca F., C. Garcia, M.T. Hernández, A. Roldán. 2002. Aggregate stability changes after organic amendment and mycorrhizal inoculation in the afforestation of a semiarid site with *Pinus halepensis* *Applied Soil Ecology*, 19, 199–208.
- Caron J., C. R. Espindola, D. A. Angers. 1996. Soil Structural Stability during Rapid Wetting: Influence of Land Use on Some Aggregate Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 901-908
- Chalhoub M., P. Garnier, Y. Coquet, B. Mary, F. Lafolie, S. Houot. 2013. Increased nitrogen availability in soil after repeated compost applications: Use of the PASTIS model to separate short and long-term effects. *Soil Biology & Biochemistry* , 65, 144-157
- Chan, K.Y. 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity—implications for functioning in soils. *Soil Till. Res.* 57,179–191.
- Chantigny M.H., D.A. Angers, D. Prévost, L.P. Vézina, F.P. Chalifour. 1997. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 262–267.
- Chantigny M.H., D.A. Angers. 2008. Carbohydrates. In: *Soil sampling and methods of analysis*, 2nd edn (eds M.R. Carter & E.G. Gregorich), pp. 653–665. CRC Press, Boca Raton FL.
- Chantigny, M.H., D. Prévost, D.A. Angers, L.P. Vézina, F.P. Chalifour. 1996. Microbial biomass and N transformations in two cropped with annual and perennial species. *Biol. Fertil. Soils*, 21, 239-244.
- Chenu C., Y. Le Bissonnais, D. Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1479–1486.
- Chenu, C. et Cosentino, D. 2011. Microbial regulation of soil structural dynamics. In *Architecture and biology of soils : Life in inner space*, Eds K. Ritz and I.M. Young. pp chapter 3. CABI.
- Chenu, C., 1989. Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biology and Biochemistry*, 21, 299-305
- Chenu, C., A.F. Plante. 2006. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex, *European journal of soil Science*, 57, 596-607.

- Cluzeau, D., M. Cannavacciuolo, G. Pérès. 1999. Indicateurs microbiologiques des sols: les lombriciens-Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zone tempérée. In: Institut Technique du Vin. (Eds.), 12^e me Colloque Viticole et oenologique. ITV Paris, pp. 25–35.
- Coleman K., D.S. Jenkinson, G.J. Crocker, P.R. Grace, P.R. Klir, M. Poulton, P.R. Richter, D.D. Richter. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 81, 29-44.
- 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 l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon. 214 p.
- Cosentino D., C. Chenu, Y. Le Bissonnais. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2053-2062.
- Czarnes S., P.D. Hallett, A.G. Bengough, I.M. Young. 2000. Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 51, 435-443.
- D'Haene K., J. Vermang, W. M. Cornelis, B. L.M. Leroy, W. Schiettecatte, S. De Neve, D. Gabriels, G. Hofman. 2008. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops *Soil & Tillage Research*, 99, 279–290.
- Daraghmeh, O.A., J.R. Jensen, C.T. Petersen. 2009. Soil structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam. *Geoderma*, 150, 64-71.
- De Gryze S., J. Six, R. Merckx. 2006. Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study. *European Journal of Soil Science*, 57, 693–707.
- De Gryze S., J. Six, C. Brits, R. Merckx. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 55–66
- Debosz K, S.O. Petersen, L. K. Kure, P. Ambus. 2002. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 19, 237–248.
- Degens, B.P., G.P. Sparling, L.K. Abbott. 1996. Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. *Applied Soil Ecology*, 3, 149-159.
- Denef K., J. Six, H. Bossuyt, S.D. Frey, E.T. Elliott, R. Merckx, K. Paustian. 2001 Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biol and Biochem*, 33, 1599-1611.
- Diaz-Zorita H., E. Perfect, J.H. Grove. 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage research*, 64, 3-22.
- Djajakirana G., R.G. Joergensen, B. Meyer. 1996. Ergosterol and microbial biomass relationship in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 22, 299-304.
- Elliott E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 627–633.
- Elmholt S., P. Schjonning, L.J. Munkholm, K. Debosz. 2008 Soil management effects on aggregate stability and biological binding. *Geoderma*, 144, 455-467.
- Engelking B., H. Flessa; R.G. Joergensen. 2007. Shifts in amino sugar and ergosterol contents after addition of sucrose and cellulose to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 2111–2118.
- F. Binet, R.C. Le Bayon. 1999. Space-time dynamics in situ of earthworm casts under temperate cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 85-93.
- Falloon P., P. Smith. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: Model evaluation for a regional scale application. *Soil Use and Management* 18:101–111. FAO, 2009. The state of food insecurity in the world 2009. Economic crisis-impacts and lessons learned (FAO, Rome, 2009).
- Fonte S.J., A.Y.Y. Kong, C. van Kessel, P.F. Hendrix, J. Six. 2007. Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management. *Soil Biol Biochem*, 39, 1014-1022.
- Fonte S.J., E. Yeboah, P. Ofori, G. W. Quansah, B. Vanlauwe, J. Six. 2009. Fertilizer and Residue Quality Effects on Organic Matter Stabilization in Soil Aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73, 961-966.
- Frey S.D., E.T. Elliott, K. Paustian 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biol and Biochem*, 31, 573-585.
- Frey S.D., J. Six, E.T. Elliott, 2003. Reciprocal transfer of carbon and nitrogen by decomposer fungi at the soil-litter interface. *Soil Biology & Biochem*, 35, 1001-1004.

- Garnier, P., Neel, C., Aita, C., Recous, S., Lafolie, F., Mary, B., 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *European Journal of Soil Science*, 54, 555-568.
- Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- Gong P., X. Guan, E. Witter. 2001. A rapid method to extract ergosterol from soil by physical disruption *Applied Soil Ecology*, 17, 285-289
- Hadas A., E. Rawitz, H. Etkin, M. Margolin. 1994. Short-term variations of soil physical properties as a function of the amount and C/N ratio of decomposing cotton residues. I. Soil aggregation and aggregate tensile strength. *Soil & Tillage Research*, 32, 183-198
- Hadas A., T.B. Parkin, P.D. Stahl. 1998. Reduced CO₂ release from decomposing wheat straw under N-limiting conditions: simulation of carbon turnover. *European Journal of Soil Science*, 49, 487-494
- Hallet P.D., T. Baumgartl, I.M. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practises. *Soil Science Society American Journal*, 65, 184-190.
- Haynes R.J., M. H. Beare. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile Soil Biol. Biochem. 29, 1647-1653.
- Haynes R.J., R.S. Swift, .C. Stephen. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils *Soil and Tillage Research*, 19, 77-87
- Heddadj D., C. Gascuel-Oudou, P. Cotinet, Y. Hamon. 2005. Mode de travail du sol, ruissellement et propriétés hydrodynamiques sur un dispositif expérimental de l'Ouest de la France. *Etude et Gestion des Sols*, 12, 53-66.
- Heddadj D., D. Bouvier, P. Cotinet, J. Guil, D. Lebossé, L. Le Roux, J. P. Turlin, G. Pérès, M. Corson, V. Hallaire, S. Menasseri, K. Hoeffner, M. Pulleman et J. Faber. 2014. Techniques culturales sans labour. Guide pratique 2014. Chambres d'Agriculture de Bretagne (Ed). 43 p.
- Hénin S., G. Monnier, A. Combeau. 1958. Méthodes pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales d'Agronomie*, 9, 73-92.
- Hindell, R.P., B.M. McKenzie, J.M., Tisdal, M.J. Silvapulle. 1994. Relationships between casts of geophagous earthworms (*Lumbricidae*, *Oligochaeta*) and matric potential. *Biol. Fertil. Soils* 18, 119-126.
- Jastrow J.D., R.M Miller. 1997. Soil aggregate stabilisation and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 207-223.
- Jastrow J.D., R.M. Miller, J. Lussenhop. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biol Biochem* 30, 905-916
- Jouquet, P., N. Bottinelli, P. Podwojewski, V. Hallaire, T. Tran Duc. 2008. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma* 146, 231-238.
- Jung J.Y., R. Lal, J. D. Jastrwo, D. D. Tyler. 2011. Nitrogenous fertilizer effects on soil structural properties under switchgrass. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141, 215-220.
- Kandeler E., E. Murer. 1993. Aggregate Stability and Soil Microbial Processes in a Soil with Different Cultivation. *Geoderma*, 56, 503-513.
- Karlen DL, De Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In Doran, Coleman, Bezdicak, Stewart. *Defining soil quality for sustainable environment* (53-72) Madison, WI SSSA : Special Publication n°35, ASA and SSSA.
- Kaur, T., B.S. Brar, N.S. Dhillon. 2008. Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize-wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81, 59-69.
- Kemper W.D, R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-442. In A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Agron.Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kiem, R., Kandeler, E., 1997. Stabilization of aggregates by microbial biomass as affected by soil texture and type. *Applied Soil Ecology* 5, 221-230 Kinsbursky, R.S., Levanon, D., Yaron, B., 1989. Role of fungi in stabilizing aggregates of sewage sludge Amended soils. *Soil Science Society of America Journal* 53, 1086-1091.
- King P.M., 1981. Comparison of Methods for Measuring Severity of Water Repellence of Sandy Soils and Assessment of Some Factors That Affect Its Measurement. *Aust. J. Soil Res.*, 19, 275-285.

- Knapp E.B., L.F. Elliott, G.S. Campbell. 1983. Carbon, nitrogen and microbial biomass interrelationships during the decomposition of wheat straw - a mechanistic simulation-model. *Soil Biology and Biochemistry* 15, 455-461.
- Kong A.Y.Y., J. Six, D.C. Bryant, R.F. Denison, C. van Kessel. 2005. The relationship between Carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1078-1085.
- Kushwaha C.P., S.K. Tripathi, K.P. Singh. 2001. Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem. *Applied Soil Ecology*, 16, 229-241.
- Lashermes G., B. Nicolardot, V. Parnaudeau, L. Thuries, R. Chaussod, M.L. Guillotin, M. Lineres, B. Mary, L. Metzger, T. Morvan, A. Tricaud, C. Villette, S. Houot. 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60, 297-310.
- Le Bissonnais Y. 1996a. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal Soil Science*, 47, 425-437.
- Le Bissonnais Y., S. Cros-Cayot, C. Gascuel-Oudoux. 2002. Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*, 22, 489-501.
- Le Bissonnais, Y. & Arrouays, D. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*, 48, 39-48.
- Le Guillou C., D.A. Angers, P. Leterme, S. Menasseri-Aubry. 2011. Differential and successive effects of residue quality and soil mineral N on water-stable aggregation during crop residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, 43, 1955-1960
- Le Guillou C., D.A. Angers, P. Leterme, S. Menasseri-Aubry. 2012. Over-winter changes in water-stable aggregation are related to crop residue quality. *Soil Use and Management*, 28, 590-595
- Le Guillou C., D.A. Angers, P.A. Maron, P. Leterme, S. Menasseri-Aubry. 2012. Linking microbial community to soil water-stable aggregation during crop residue decomposition. *Soil Biol. Biochem*, 50, 126-133
- Lejon DPH, J Sebastia, I Lamy, R Chaussod, L Ranjard. 2007a. Relationships between soil organic status and microbial community density and genetic structure in two agricultural soils submitted to various types of organic management. *Microbial Ecol.* 53, 650-663.
- Lejon, DPH, V Nowak, S Bouko, N Pascault, C Mougél, JMF Martins, L Ranjard. 2007b. Fingerprinting and diversity of bacterial copA genes in response to soil types, soil organic status and copper contamination. *FEMS Microbiol Ecol.* 61, 424-437.
- Lemercier B., C. Walter, N. Saby, C. Schwartz, D. Arrouays, S. Follain. 2006. Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 3, 165-179.
- Leroy, B.L.M., Herath, H.M.S.K., Sleutel, S., De Neve, S., Gabriels, D., Reheul, D, Moens, M. 2008. The quality of exogenous organic matter: short-term effects on soil physical properties and soil organic matter fractions. *Soil Use and Management*, 24, 139-147.
- Letey, J., 1969. Measurement of the contact angle, water drop penetration time, and critical surface tensions, *Proceedings of the Symposium on Water-Repellent Soils*, University of California, Riverside, pp. 43-47.
- Lynch, J.M., and E. Bragg. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Sci.* 2:133-171.
- Malamoud K., A.B. McBratney, B. Minasny, D.J. Field. 2009. Modelling how carbon affects soil structure. *Geoderma*, 149, 19-26.
- Manzoni S., A. Porporato. 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 1355-1379
- Marinissen J.C.Y., A.R. Dexter. 1990. Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. *Biol. Fertil. Soils* 9, 163-167.
- Martens D.A., 2002. Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1857-1867.
- Martens D.A., W.T. Frankenberger. 1992. Modification of infiltration rates in an organic-amended irrigated soil. *Agronomy Journal*, 84, 707-717.
- Martens, D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 361-369.

- Martin J.P, S.A. Waksman. 1940. Influence of microorganisms on soil aggregation and erosion. *Soil Science*, 50, 29–48.
- Martin J.P. 1945b. Microorganisms and soil aggregation: II. Influence of bacterial polysaccharides on soil structure. *Soil Science*, 60, 157–166.
- Martin T.L., D.A. Anderson. 1943. Organic matter decomposition, mold flora, and soil aggregation relationships. *Soil Science Society of America Journal*, 7, 215-217.
- Masto R.E, P.K. Chonkar, A.K. Dhyan S. Patra. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Envir Monit Assess* 136, 419-435.
- McGuire K.L., K.K. Treseder. 2010. Microbial communities and their relevance for ecosystem models: decomposition as a case study. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 529-535
- Metay, A., B. Mary, D. Arrouays, J. Labreuche, M. Martin, N. Nicolardot, J.C. Germon. 2009. Effects of reduced or no tillage practices on C sequestration in soils in temperate regions. *Canadian Journal of Soil Science* 89, 623 - 634
- Molina J.A.E., C.E. Clapp, M.J. Shaffer, F.W. Chichester, and W.E. Larson. 1983. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformation in soil: Description, calibration, and behavior. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 85–91.
- Monnier G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 16, 327–400.
- Moorhead D., R. Sinsabaugh. 2006. A theoretical model of litter decay and microbial interaction. *Ecological Monographs*, 76, 151-174.
- Morel J.L., L. Habib, S. Plantureux, A. Guckert. 1991. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 111–119.
- Myers, R.J.K., C.A. Campbell, and K.L. Weier. 1982. Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. *Can. J. Soil. Sci.* 62:111–124.
- Nicolardot B., L. Bouziri, F. Bastian, L. Ranjard. 2007. A microcosm to evaluate the influence of location and quality of plant residues on residue decomposition and genetic structure of soil microbial communities. *Soil Biol and Biochem*, 39, 1631-1644.
- Nicolardot B., S. Recous, B. Mary. 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228, 83–103.
- Oades, J.M., A.G. Waters. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.*, 29, 815-828
- Pagliai P., N. Vignozzi, S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices *Soil & Tillage Research*, 79, 131–143
- Pérès G., Cluzeau D., S. Menasseri, J.F. Soussana, H. Bessler, C. Engels, M. Habekost, G. Gleixner, A. Weisser, S. Scheu, N. Eisenhaur. 2013. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. *Plant and soil*, 373, 285-299
- Perfect E., B.D. Kay., W.K.P. van Loon, R.W. Sheard, T. Pojasok. 1990. Factors influencing soil structural stability within a growing season. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 173–179.
- Perreault J.M., N. S. Eriksen-Hamel, J. K. Whalen. 2007. Temporal and spatial dynamics of earthworm surface casting in a temperate soybean agroecosystem. *Applied soil ecology*, 37, 10 – 17.
- Pikul, J.L., Rice G.C.J., Eynard, A., Schumacher, T.E., Nichols, K., Johnson, J.M.F., Wright, S., Caesar, T., Ellsbury, M., 2009. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73, 197-206
- Powlson, D.S., P. Smith, J.U. Smith (Eds.), 1996. Evaluation of Soil Organic Matter Models. Using Existing Long-term Datasets. Springer, p. 429.
- Puget P., R. Lal, C. Izaurrealde, M. Post and L. Owens. 2005. Stock and distribution of total and corn-derived soil carbon in aggregate and primary particle fractions for different land use and soil management practices. *Soil Sci.*, 170, 256-278.
- Puget, P., Angers, D.A., Chenu, C., 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 55-63.

- Ranjard, L., Lejon, D.P.H., Mougél, C., Schehrer, L., Merdinoglu, D., Chaussod, R., 2003. Sampling strategy in molecular microbial ecology: influence of soil sample size on DNA fingerprinting analysis of fungal and bacterial communities. *Environmental Microbiology* 5, 1111-1120.
- Rasse, DP. J. Mulder, C. Moni, C. Chenu. 2006. Carbon turnover kinetics with depth in a french loamy soil. *Soil Science Society of America journal*, 70, 2097-2105.
- Recous S., D. Robin, D. Darwis, B. Mary., 1995. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 1529-1538
- Recous, S. 1994. Réponse des matières organiques des sols aux changements atmosphériques globaux: II. Effet de la température sur la minéralisation d'un résidu végétal (maïs) et de la matière organique du sol. p. 81–85. In Séminaire Ecosystèmes et changements globaux. 17–19 May 1994. Dourdan, France.
- Rees R.M., I.J. Bingham, J.A. Baddeley, C.A. Watson. 2005. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma*, 128, 130-154.
- Richard G., J. Boiffin. 1990. Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures. Dans « Structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur » J. Boiffin (éditeur) Les colloques de l'INRA, INRA, Versailles, France, 53, 111-134.
- Rillig M.C., N. F. Mardatin, E.F. Leifheit, P.M. Antunes. 2010. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, 1189-1191
- Roldan, A., J. Albaladejo, J.B. Thornes. 1996. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10, 139–148.
- Rousk, J., E. Baath. 2007. Fungal and bacterial growth in soil with plant materials of different C/N ratios. *FEMS Microbiology Ecology*, 62, 258–267.
- Sanaullah M., A. Chabbi, G. Lemaire, X. Charrier, C. Rumpel. 2010. How does plant leaf senescence of grassland species influence decomposition kinetics and litter compounds dynamics? *Nutr Cycl Agroecosyst*, 88, 159–171.
- Schlecht-Pietsch S., U. Wagner, T-H Anderson. 1994. Changes in composition of soil polysaccharides and aggregate stability after carbon amendments to different textured soils. *Applied Soil ecology*, 1, 145-154.
- Schwartz S.M., P.G. Freeman, C.R. Russell. 1958. Soil-conditioning properties of modified agricultural residues and related materials: II. Persistence of soil stabilizing activity as a function of type and extent of modification. *Soil Science Society of America Journal*, 22, 409-414.
- Segoli M., S. De Gryze, F. Dou, J. Lee, W.M. Post, K. Denef, J. Six. 2013. AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies. *Ecological Modelling*, 263, 1-9.
- Senthilkumar S., A. N. Kravchenko, G. P. Robertson. 2009. Topography Influences Management System Effects on Total Soil Carbon and Nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:2059-2067.
- Shipitalo M.J., R. Protz. 1988. Factors influencing the dispersibility of clay in worm casts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 764–769.
- Shukla M.K., R. Lal, M. Ebinger. 2004. Soil quality indicators for the north Appalachian experimental watersheds in Coshocton. *Soil Science*, 169, 195-205.
- Shukla M.K., R. Lal, M. Ebinger. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research*, 87, 194–204
- Simon T., M. Javurek, O. Mikanovna, M. Vach. 2009. The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity. *Soil Tillage Research*, 105, 44-48.
- Six J., E.T. Elliott, K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 2099-2103
- Six J., G. Guggenberge, K. Paustian, L. Haumaier, E. T. Elliott, W. Zech. 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *European Journal of Soil Science*, 52, 607-618.
- Six J., H. Bossuyt, S. Degryze, K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79, 7–31.
- Skinner F.A., 1979. Rothamsted studies of soil structure. VII. The effects of incubation on soil aggregate stability. *Journal of Soil Science*, 30, 473–481.

- Smith P., J.U. Smith, D.S. Powlson, W.B. McGill, J.R.M. Arah, J.R.M. Chertov, K. Coleman, U. Franko, S. Frolking, D.S. Jenkinson, L.S. Jensen, R.H. Kelly, H. Klein-Gunnewiek, A.S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Mueller, W.J. Parton, J.H.M. Thornley, A.P. Whitmore. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153–225.
- Sonnleitner, R., E. Lorbeer, F. Schinner. 2003. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem. *Applied Soil Ecology*, 22, 195–204.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., García-Martínez, A.M., Parrado, J., 2008. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresour. Technol.*, 99(11): 4949-4957.
- Tisdall, J.M., and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141–163.
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Line`res, M., Che`neby, D., Nicolardot, B., 2000. Biochemical Quality of Crop Residues and Carbon and Nitrogen Mineralization Kinetics under Nonlimiting Nitrogen Conditions. *Soil Science Society of America Journal* 64, 918-926.
- Trumbore S.E., C.I. Czimczik. 2008. An uncertain future for soil carbon. *Science*, 321, 1455-1456.
- Urbaneck E., P. Hallett, D. Freeney, R. Horn. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma*, 140, 14-155
- Van Apeldoorn D.F., M.P.W. Sonneveld, K. Kok. 2011. Landscape asymmetry of soil organic matter as a source of agro-ecosystem resilience. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 140, 401-410.
- Van Soest P.J. 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. I. Preparation of fiber residues of low nitrogen content. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 46, 825–835.
- Vance E.D., P.C. Brookes, D.S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703–707.
- Vandevivere P., B. Moreau, J.E. Dufey, C.N. Chaing. 1990. Effet de l'azote minéral sur la stabilité structurale d'un sol limoneux amendé par des résidus organiques. *Revue de l'Agriculture* 43, 176-186.
- Viaud V., D.A. Angers, V. Parnaudeau, T. Morvan, S. Menasseri-Aubry. 2011. Response of soil organic matter to reduced-tillage and animal manure in a temperate loamy soil. *Soil Use and Management*, 27, 84-93
- Walter C., C. Schwartz., B. Claudot, T. Bouedo, P. Arousseau. 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Étude et Gestion des Sols*, 3, 205-219
- Watteau F., G. Villemin, G. Burtin, L. Jocteur-Monrozier. 2006. Root impact on the stability and types of micro-aggregates in silty soil under maize. *European Journal of Soil Science*, 57, 247-257.
- Wold S., M. Sjostrom, L. Eriksson. 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58, 109-130.
- Yang X.M. et M.M. Wander. 1998. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. *Soil & Tillage Research*, 49, 173-183
- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. of Am. Soc. of Agronomy* 28, 337–351.
- Zaher H., J. Caron, D.A. Angers. 2005. Pore occlusion by sugars and lipids as possible mechanism of aggregate stability in amended soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 1831-1839.
- Zhang H., S. Schrader. 1993. Earthworms effects on selected physical and chemical properties of soil aggregates. *Biol. Fertil. Soils* 15, 229–234.