



Association Française
pour l'étude du sol



2021

ACTES
des
15^{èmes} **Journées d'Étude des Sols**

Programme

Résumés des communications

Semaine du 21 au 25 juin



International Union of Soil Sciences



**International
Decade of Soils**
2015-2024

Version du 17 juin 2021

Edition : M. Brossard, Agnès Gosselin, Sophie Raous

Directeur de la publication : Jacques Thomas

Les résumés peuvent être ainsi cités :

Auteur (s), 2021 – Titre. *In Actes 15^{èmes} Journées d'étude du sol, 21-25 juin 2021, session X, n° des pages, AFES (Orléans, France), communications en visioconférence à partir de Montpellier.*

AFES
2163, Avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 Ardon
45075 Orléans Cédex 2

www.afes.fr

Les actes sont disponibles en format numérique sur le site de l'AFES :
<https://www.afes.fr/actions/les-journees-detude-des-sols/>

Comité d'organisation

Delphine Aran, Université de Lorraine, UMR LIEC, Metz, administratrice AFES

Isabelle Basile-Doelsch, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence

Thierry Becquer, IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier

Alain Brauman, IRD, UMR Eco&Sols, administrateur AFES

Michel Brossard, IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier

Yvan Capowiez, INRAE Avignon - unité EMMAH

Tiphaine Chevallier, IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier

Daniel Cluzeau, Université de Rennes 1, Laboratoire ECOBIO

Jérôme Cortet, CEFÉ, Univ. Paul Valéry Montpellier 3

Guillaume Coulouma, INRAE, UMR LISAH Centre de Montpellier

Agnès Gosselin, secrétaire générale AFES

Philippe Lagacherie, INRAE, UMR LISAH Centre de Montpellier

Blandine Lemercier, Institut Agro (AGROCAMPUS OUEST) – INRAE, UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation

Joël Moulin, pédologue à la retraite

Sophie Raous, coordinatrice AFES

Siobhan Stauton, INRAE, UMR Eco&Sols, trésorière-adjointe AFES

Avec l'aide dans la première phase de réflexion de

Eric Blanchart, Jean-Luc Chotte, Frédéric Feder, Julien Fouche, Claude Hammecker, Maritxu Guirèze, Mickaël Hedde, Claire Marsden, Priscia Oliva, Chiara Pistocchi, Olivier Ribolzi, Jean Trap, Marc Voltz

En guise d'introduction,

Les Journées d'Etudes des Sols ont déjà 32 ans (1989) sous forme de biennales jamais interrompues, tout juste retardées par une pandémie. Trente deux ans, à peine plus que la revue Etudes et Gestion des Sols (1992). Les webinaires AFES sont eux très récents (2012) mais anticipaient déjà ce qui en 2020 est devenu une forme de communication usuelle.

Ces initiatives ne seraient pas possibles sans le dévouement constant des membres de l'Association Française pour l'Etude du Sol créé en 1934. Les ressources et la richesse de l'AFES ce sont ses membres qui perpétuent les objectifs initiaux de l'association toujours d'actualité : favoriser le développement des sciences du sol, créer du lien entre les personnes qui pratiquent ces disciplines et favoriser le transfert de connaissances et d'informations.

Aujourd'hui paradoxalement, on observe à la fois une prise de conscience de l'intérêt des sols parmi le grand public, une organisation des institutions et une forme de désengagement des professionnels eux même. Est-ce lié à la conjoncture, l'organisation actuelle de la recherche, les nouvelles pratiques sociales .. ? L'AFES est la seule structure qui fédère des individus autour des sciences du sol. Ce qui est certain c'est que sans des personnes engagées pour tisser des liens entre sciences et société, les sciences du sol seront certainement mal comprises ou mal utilisées par la société. Nous appelons à tous ceux d'entre vous qui contribuent, bénéficient ou participent aux travaux de ces Journées d'Etudes des Sols et qui pensent que les objectifs visés par l'AFES les concernent et sont utiles, à nous rejoindre. Je pense tout particulièrement aux jeunes chercheurs de toutes ces disciplines des sciences du sol, c'est votre avenir qui est en jeu. Aujourd'hui le conseil d'administration de l'AFES souhaite aussi renforcer son action auprès des jeunes en formation et de tous les acteurs du sol, on a besoin d'idées, de soutien, d'engagements alors si vous vous sentez concernés venez dynamiser cette société savante de 87 ans.

Merci d'avoir rejoint ce congrès un peu particulier cette année organisé par un collectif d'enseignants et chercheurs.

Vous comprenez que nous avons été pris de court par la pandémie pour mettre en perspective ce congrès en 2020. Mais au sein de l'AFES, de son CA, il a paru évident que nous ne pouvions pas repousser encore une fois. Deux arguments nous ont guidé :

- d'une part que les doctorants aient l'occasion de présentation de leurs travaux, ce qui est l'esprit de ces journées depuis leur création. Cette vision était juste, plus de la moitié des travaux qui ont été soumis sont de personnes en cursus de formation ;
- d'autre part, le second argument est plus « politique » : rompre plus longtemps le rythme d'un congrès qui s'est installé dans le paysage de notre association depuis une trentaine d'années serait nuisible à l'efficacité de l'ensemble.

Alors nous avons reçu ici et là des doléances diverses, sur le mode, sur les contenus, quel thème général, etc. Nous ne contenterons jamais tout le monde. Le résultat est un compromis, de débats entre une trentaine de personnes, puis le resserrement autour d'un comité d'organisation après quelques décisions qui donnaient les axes.

Pas de thème général ? mais on a vu fleurir de nombreux thèmes récurrents sur sols dans des actions scientifiques, et pas que. Donc nous avons décidé de garder le titre « Journées des sols » qui se suffit à lui-même d'autant qu'il appelle à un contenu révélant la *curiosité et la compréhension scientifique* dans le vaste domaine de la *science du sol*.

Ces actes permettent de regrouper les résumés des communications, de les rendre visibles en particulier pour les plus jeunes.

Jacques Thomas, Président
Michel Brossard, ancien Président

Programme

Lundi 21	Mardi 22	Mercredi 23	Jeudi 24	Vendredi 25
9-10h Ouverture	9h30-12h30 – Session 2 Matières organiques		9h30-12h30 Session 4 Sols d'ici et d'ailleurs : sols naturels, sols reconstruits.	9h-12 – Session 6 Notion de qualité des sols et indicateurs
10h12h - Session 1 Pédologie numérique	14h30-15h30 Session 2 salle 1	14h30- 17h Session 3 Terrain virtuel	14h30-16h Session 5 - Table ronde, Enseignement et formation en sciences du sol : évolution des contenus et des pratiques	14h30-16h30 – Session 7 Les Sciences Participatives et les sols
14h30 – 16h15 – Session 1 Pédologie Numérique	14h30-16h15 Session 2 salle 2			16h45-17h40 Suite Session 6
				17h45 clôture de la JES

!!! Les portes informatiques seront ouvertes une demi-heure avant les sessions pour permettre la réalisation des connexions en toute quiétude et de débiter à l'heure précise.

A noter que les sessions ont lieu dans la même salle informatique, sauf le mardi après-midi où deux salles en parallèle sont mises à disposition.

Programme détaillé des sessions

Lundi 21 juin

Session : ouverture

9-9h50 h

Jacques Thomas, Président AFES & Michel Brossard
Hommages à François Toutain et Jérôme Balesdent par un collectif de collègues.

Pause

Lundi 21 juin

Session 1 - Pédologie numérique

Organisation et Animation : Philippe Lagacherie et Blandine Lemerrier

10h-12h

Sous-session 1.1 : méthodes de mesure innovantes de propriétés physiques des sols

G. Coulouma	Une nouvelle méthode de mesure in situ de la densité apparente des sols adaptée à tout type de sol.
W. Faye	Caractérisation hydraulique des sols d'un agrosystème fortement cultivé du bassin arachidier sénégalais en utilisant la méthode BEST.
S. Cheick	Analyse par tomographie à rayons X de la structure des biopores du sol sous des cycles de humectation et de dessiccation.
N. Saby	Evaluation d'une nouvelle méthode de mesure de la stabilité structurale des sols basée sur une application smartphone.

Sous-session 1.2 : Solutions informatiques pour la capitalisation des données sols

L. Bargeot	Outils de saisie pour la caractérisation des sols.
Y. Berdai	Une approche de l'agriculture de précision basée sur l'Internet des objets connectés (IoT).
	Discussion générale

14h30-16h15

Sous-session 1.3 : caractérisation de propriétés des sols par spectrométrie

C. Gomez	Prédire la teneur en C inorganique d'un sol par spectrométrie infrarouge (MIRS) : Utilisation du pic d'absorption des carbonates pour sélectionner le modèle de prédiction le plus approprié.
J. Oliveira	Relations entre les spectres Vis-NIR et les propriétés du sol : application à l'échelle du champ aux horizons de diagnostic de latosols (Brésil).
M. Allo	Pédologie spectrale : la spectroscopie moyen infra-rouge pour cartographier les sols de La Réunion.
A. Zidi	Cartographie des états de surface des sols en zones sahariennes à l'aide de la

	téledétection optique et radar. Cas de la région de Guerrara (Algérie).
M. Dodin	Potentiel des images satellitaires Sentinel-2 au suivi des applications de compost de déchets verts et de fumier en région septentrionale de grandes cultures.
	Discussion générale et clôture session 1

Mardi 22 juin

Session 2 - Les matières organiques des sols, caractérisation et dynamique

Organisation et Animation : Tiphaine Chevallier & Isabelle Basile-Doelsch

9h30 – 12h30

Session 2-1 : Nouvelles approches de caractérisation des MOS et de leurs dynamiques

P. Barré	Aspects énergétiques des MOS
O. P. Malou	Analyse Rock-Eval® de la matière organique des sols sableux cultivés du centre du Sénégal : une signature thermique particulière.
C. Chirol	Application de la tomographie RX à l'analyse structurale des composantes d'un sol : macroporosité, réseau racinaire et nécromasse.
F. Jamoteau	Imagerie chimique des associations organo-minérales du sol à l'échelle nanométrique.
Pause	

Session 2-2 : Processus, dynamique et stock des MOS des litières et des sols

C. Jaqueton	Des données ouvertes sur la décomposition des litières végétales dans les sols selon divers contextes agronomiques et pédoclimatiques.
R. Huys	La chimie de la litière végétale contrôle la dynamique du carbone des sols à texture grossière.
K. A. Kouakou	La restitution des résidus d'hévéas après abattage de la précédente plantation améliore la restauration de la faune du sol.
B. Hulin	Devenir du carbone de produits résiduels organiques dans deux profils de sols tropicaux (0-100 cm) par approche isotopique du carbone 13.
I. A. Houssoukpevi	Stocks de carbone dans les sols et les biomasses des principaux modes d'occupation du plateau d'Allada (Sud du Bénin).
Discussion générale	

14h30-15h30

Session 2-3, Salle 1 : Dynamique des MOS après apports d'amendements - puis un focus phosphore

M-L. Aubertin	Etude des interactions biochar-compost sur les services écosystémiques des sols.
V. Miconnet	Etude des interactions biochar-compost sur le stockage de carbone dans le sol après 14 mois en milieu tempéré.
S. Langunu	Phytostabilisation des sols contaminés en éléments traces métalliques à Lubumbashi : effet des amendements organiques et du calcaire sur la performance des six espèces ligneuses.

W. Lima Barroso	Dynamique de formation de la détritosphère à nano-échelle par NanoSIMS : cas de pailles de maïs incubées dans un gleysol.
Discussion	
H. O. Ratsiatosika	L'introduction d'organismes du sol améliore-t-elle l'effet des amendements organiques sur la croissance du riz cultivé dans un sol déficient en phosphore ?
P. Raguet	Quantification des flux nets de minéralisation à long-terme du phosphore organique d'un sol cultivé sous fertilisation minérale.
K. Brice	Influence des interactions hydrophobes sur le fonctionnement de phosphatases fongiques.
Discussion	

14h30-16h

Session 2-4, **salle 2** : Techniques d'analyse, variabilité spatiale et activités microbiennes pour comprendre la dynamiques des MOS selon les pratiques agricoles

A. Delahaie	Intérêt des techniques d'analyse thermique pour déterminer la stabilité biogéochimique pluri-décennale du carbone organique des sols.
S. Quero	Dynamique de la perte de C du sol par changement d'usage forêt /vigne à échelle centennale ; apport des approches par radiocarbone.
E. Kanari	Améliorer la précision des modèles de dynamique du carbone organique du sol à l'aide d'une méthode d'initialisation robuste.
M. Allo	Potentialités de (dé)stockage du carbone dans les sols agricoles de La Réunion. Approche spatiale et spectroscopie moyen infra-rouge.
Discussion	
T. Ramananjatovo	Effets des pommiers sur la distribution spatiale et la dynamique temporelle de la matière organique dans un système verger-maraîcher.
G. Cissé	L'accumulation et la distribution verticale de GRSP (Glomalin-Related Soil Protein) dans les sols forestiers contribuent-elles à la compréhension de son origine ?
L. Siegwart	La distribution et la qualité des racines de blé dur sont modifiées dans un système agroforestier jeune : impact sur le stockage de carbone dans le sol ?
Z. Bounouara	Variations verticales et horizontales des stocks de carbone organique au long d'une toposéquence du Nord Est de l'Algérie.
Discussion	
M. N. El Houda Bensayah	Effet des microorganismes de sol sur la séquestration de carbone organique dans différents pédo-paysages de la cuvette Ouargla.
S. Le Gall	Les activités microbiennes et les exopolysaccharides influencent la rétention d'eau du sol de deux cultivars de tomate et contribuent à l'adaptation de la plante au manque d'eau.
T. I. Kpemoua	L'humidité du sol et les cycles sec-humides affectent-ils la minéralisation du carbone stocké par les systèmes alternatifs ?
C. Védère	Comment le statut hydrique du sol influence le devenir des matières organiques du sol ? Une revue des processus à des échelles variées.
Discussion générale et clôture session 2	

Mercredi 23 juin

Session 3 - Terrain virtuel

Organisation et Animation : Guillaume Coulouma

14h30-17h

Après une rapide présentation du contexte géologique et géomorphologique, **présentation de 3 profils sur le terrain avec de courts films**, ces présentations sont suivies

- a) d'une mise en perspective de recherche avec la participation de D. Montagne (AgroParisTech) et P. Lagacherie (INRAE),
- b) du débat.

Projection de deux films sur des expérimentations à long terme, suivis d'un débat :

« Les dessous d'une expérimentation en agroforesterie méditerranéenne », réalisé par le service audiovisuel de l'Institut Agro pour l'UMR Eco&Sols, décrit l'histoire du site expérimental DIAMS depuis sa création en 2017. En croisant les regards des protagonistes, il retrace les réflexions qui ont conduit à la naissance du site et les questions de recherche qui y sont posées à moyen et long termes, dans un contexte de quête d'alternatives agroécologiques pour les productions de grandes cultures en conditions méditerranéennes. Le film suit sur le terrain les techniciens, stagiaires et chercheurs engagés dans les diverses expérimentations en cours sur ce système en agroforesterie intraparcellaire, qui se focalisent à la fois sur ses compartiments souterrains et aériens, vivants et non vivants, et l'étude des cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore.

« Le temps d'observer » réalisé par Olivier Grunberger (IRD-UMR Lisah) décrit l'observatoire de recherche en environnement OMERE, sous des aspects variés. L'observation sur des temps longs est évoquée, en abordant les avantages et les difficultés rencontrées après plus de 29 ans de suivis expérimentaux. Les aspects scientifiques, techniques et humains sont mêlés tout au long du film, en intégrant les concepteurs, les acteurs de terrain et les habitants des deux sites expérimentaux, en France et en Tunisie.

Avec la participation de Claire Marsden (IRC - Montpellier SupAgro) et Isabelle Bertrand (INRAE) de l'UMR Eco&Sols et Damien Raclot (IRD) et Jérôme Molénat (INRAE) de l'UMR Lisah.

Jeudi 24 juin

Session 4 - Sols d'ici et d'ailleurs : sols naturels, sols reconstruits.

Organisation et Animation : Thierry Becquer & Joël Moulin

9h30-12h30

M. Dessaint	Archéologie et sols : caractériser les interactions sociétés/milieus chez les Rèmes entre le IIIe s. av. et le VIe s. ap. J.-C.
X. Marié	« EcoValoSols » : une réponse opérationnelle pour produire des anthroposols reconstitués face aux enjeux de la désartificialisation des sols de friche urbaine.
J. Araujo	Construire des sols fertiles à partir de déchets urbains : interactions entre la matière organique et les vers de terre.
M. A. Raminoarison	Les assemblages des matières organiques et minérales comme pratiques innovantes de restauration de la fertilité des sols.
J. K. Mwanasomwe	Effet de l'amendement organique d'un bassin de décantation cupro-zincifère sur les caractéristiques physico-chimiques des horizons et le développement racinaire des végétaux ligneux 14 ans après plantation.
Pause	
C. Pirlot	Les choix méthodologiques influencent-ils les résultats ? Application aux essais de lixiviation en colonne de sol.
I. Amadou	Adsorption et désorption des formes organiques de phosphore par les oxyhydroxydes de Fe/Al, les minéraux argileux et les substances humiques.
V. Antoni	Nouveau zonage de l'exposition au retrait-gonflement des argiles (loi ELAN) : plus de 10,4 millions de maisons individuelles potentiellement très exposées
A. Idder	Approche géochimique à la prédiction de la salure dans les aridosols nus : l'exemple de la cuvette de Ouargla le bas Sahara Algérien.
A.A. Adoum	Les sols de polders Sahéliens du lac Tchad (Bol) : Des sédiments alluvionnaires aux sols différenciés.
D. J. B. Ettien	Caractérisation des propriétés physiques des sols du Sud-est forestier de la Côte d'Ivoire pour la mise en valeur agricole dans la localité d'Azguié.
Discussion et clôture de session	

Jeudi 24 juin,

Session 5 - Enseignement et formation en sciences du sol : évolution des contenus et des pratiques

Organisation et Animation : Philippe Prévost

Format table ronde avec 5 intervenants

14h30 – 16h

Avec :

- Yves Coquet, enseignant-chercheur à AgroParisTech
- Jean-Robert Moronval, Inspecteur pédagogique en agronomie de l'enseignement technique agricole
- Marc-André Sélosse, membre du groupe de coordination des programmes de biologie de l'Education Nationale
- Pierre Ganault, représentant les associations CARABES et Cosciences (mallette Ecole du sol)
- Sophie RAOUS, AFES et le projet PromoSolsEduc
- Lynda Ihadjadene, Agreenium, représentant l'équipe du MOOC Sol&Climat

Vendredi 25 juin

Session 6 - Notion de qualité des sols et indicateurs

Coordination et Animation : Jérôme Cortet, Yvan Capowiez, Alain Brauman

9h-12h

Animation : Jérôme Cortet, Yvan Capowiez

A. Brauman & L. Richelle	Santé des sols, concept scientifique ou simple métaphore sociétale ?
L. Tabaud	Incertitudes liées aux mesures des stocks de carbone organique et d'azote dans les sols agricoles.
T. Perron	Les résidus d'abattage favorisent une restauration rapide de la santé du sol après la coupe rase de plantations d'hévéas : suivi diachronique sur deux types de sol contrastés en Côte d'Ivoire.
E. Cusset	Microbioterre : Quels indicateurs de microbiologie intégrer dans l'analyse de terre pour améliorer la gestion des restitutions organiques ?
J. Trap	Quantification de l'impact global des pratiques agricoles sur les nématodes du sol : une méta-analyse.
Pause	
E. Guillot	Hétérogénéité spatiale de la qualité des sols dans un système agroforestier Méditerranéen : comparaison avec un système en monoculture.
C. Brami	Évaluation multicritère de l'effet des cendres de <i>Miscanthus × giganteus</i> sur la qualité du sol d'un champ de blé.
C. Decourcelle	Indicateur de santé des sols pour monitorer la transition.
D. Masse	La gestion durable des sols peut-elle contribuer à la neutralité carbone d'une entité industrielle gestionnaire d'un domaine foncier ? Cas de l'aéroport d'Abidjan en Côte d'Ivoire.
Discussion générale et fin de matinée	

!!!!!! La Session 6 se poursuit à 16h45 après la Session 7 « sciences participatives »

16h45-17h40

Animation : Jérôme Cortet et Alain Brauman

T. Eglin	Un numéro spécial de la revue Etude et Gestion des Sols : « Fonctions des sols et services écosystémiques »
L. Marchal	Influence du changement climatique sur la dynamique des pollutions organiques dans les sols alpins.
B. Karimi	Novasol Experts, un bureau d'étude pour une expertise innovante de la qualité écologique des sols.
L. Rigou	Les membranes échangeuses d'ions : un indicateur de qualité des sols au service de la pédologie de terrain.
M. Brondani	Effet de l'élévation de la concentration atmosphérique en CO ₂ sur les communautés de nématodes du sol : conséquence sur la nutrition de la tomate et du blé dur.
Discussion et clôture de la session 6	

Vendredi 25 juin

Session 7 - Les Sciences Participatives et les sols

Coordination et Animation : Daniel Cluzeau

Format table ronde avec 5 intervenants, format interventions-témoignages entrecoupés de Q/R avec le public.

14h30-16h30

Avec :

- Anne Dozières, MNHN
- Apolline Auclair, Université de Lorraine - ENSAIA
- Blandine Lemerrier, Agrocampus Ouest – INRAE

Et les témoignages de :

- Camila Andrade, animatrice MNHN SBT-ENI
- Chloé Dusacre, animatrice REVA
- Marine Zwicke, enseignante

Deux courtes présentations de projets en démarrage :

- Marie Beauchesne, Les vers de terre face aux changements climatiques
- Quentin Styc, La cartographie des sols par modélisation statistique (CSMS) peut-elle se fonder sur une collecte de données sur les sols par les citoyens ? L'exemple de la cartographie de texture du sol dans la commune de Bouillargues (Gard).

!!!!!! La Session 6 se poursuit à 16h45 dans la même salle informatique

Vendredi 25 juin

Session : clôture

17h45

Jacques Thomas, Président AFES, Michel Brossard

Résumés des communications¹

¹ Les résumés sont classés par sessions et ordre de séquence de présentations

Session 1

« Pédologie numérique »

1.1 Méthodes de mesure innovantes de propriétés physiques des sols

1.2 Solutions informatiques pour la capitalisation des données sols

1.3 Caractérisation de propriétés des sols par spectrométrie

Une nouvelle méthode de mesure in-situ de la densité apparente des sols adaptée à tout type de sol

Guillaume Coulouma¹, Denis Feurer¹, Fabrice Vinatier¹, Olivier Huttel¹

¹ UMR LISAH, Univ Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, 2 place Viala 34060 MONTPELLIER

Mots-Clés : densité apparente, sols caillouteux, photogrammétrie, flash LiDAR

Introduction

La densité apparente des sols constitue une mesure de premier ordre en science du sol. Elle est nécessaire notamment aux calculs de stocks, au bilan de masse, et à la paramétrisation de modèles de transferts. Mais c'est une propriété difficile à mesurer. De nombreux auteurs ont proposé des méthodes de mesures très diversifiées. Excepté les méthodes directes par rayonnement gamma, la plupart des méthodes consistent à mesurer le volume de sol non perturbé et à mesurer la masse sèche correspondante. Elles sont toutes fastidieuses sur le terrain et sujettes à des biais variables en fonction des types de sols. En particulier pour les sols présentant des taux d'éléments grossiers importants, la plupart des méthodes ne sont plus applicables. Au fil du temps la méthode dite « au cylindre » c'est imposée comme méthode standard (Blake et Hartge, 1986) pour les sols pas ou peu caillouteux. Pour les sols plus caillouteux, les méthodes basées sur une excavation de terre dont on mesure le volume in-situ sont très courantes, avec de nombreuses variantes adaptées au cas par cas. En revanche, elles ne sont pas applicables sur la face des profils pédologiques et des marches sont nécessaires pour avoir une excavation horizontale.

Les développements récents de la photogrammétrie (SfM) permettent aujourd'hui de disposer à la fois de techniques de traitement d'image et de prises de vue sur le terrain performantes. Certains auteurs ont proposé d'utiliser ces techniques pour mesurer des volumes de terre excavés à partir de la surface du sol (Bauer et al., 2014). Les techniques de LiDAR ont été testées également (Scanlan et al., 2018 ; Polyakov, 2019). Ces méthodes permettent d'avoir une mesure de volume très peu biaisée. L'objectif de ce travail est de mettre à l'épreuve et d'adapter ces techniques aux fosses pédologiques classiques pour mesurer la densité apparente in-situ des horizons de sol, dans des situations très contrastées (Coulouma et al., 2021).

Matériel et Méthodes

L'étude a porté sur 7 fosses pédologiques réparties sur les principaux types de sols en Languedoc et 10 horizons ont été sélectionnés pour être caractérisés finement. Des descriptions morphologiques suivant les recommandations DONESOL ont été réalisées et des analyses physico-chimiques complètent les données (table 1).

Table 1 : analyses physico-chimiques des horizons étudiés

Horizons étudiés	Type de sol (WRB)	Graviers (%masse)	Cailloux (%masse)	Densité cailloux	A (%)	L (%)	S (%)	CO (g/kg)	CaCO3 (g/kg)
Lavalette H2	Calcisol	0	2	2.5	24	47	29	6.2	579
Lavalette H4	Calcisol	0	0	2.5	27	47	26	4.1	734
Mauguio 1 H2	Fluvisol	1	2	2.5	26	42	32	6	355
Mauguio 1 H3	Fluvisol	1	0	2.5	23	39	38	4.5	367
Mauguio 3 H2	Luvisol	11	62	2.3	48	27	25	3.5	0
Mauguio 3 H3	Luvisol	3	3	2.3	45	33	22	2.4	0
Mauguio 2 H2	Fluvisol	2	3	2.5	19	32	49	3.7	348
Pech H2	Cambisol	4	8	2.5	10	11	79	5	306
Angles H1	Umbrisol	14	22	1.9	12	24	64	41	0
Restincliere H2	Calcisol	8	16	2.6	20	42	38	6.7	749

Pour les comparaisons de densité apparente, chaque horizon a été caractérisé par 5 excavations verticales dont le volume a été mesuré par SfM et LiDAR et complétées par 15 prélèvements au cylindre (100 cm³, Blake et Hartge, 1986). 5 excavations complémentaires sur une marche horizontale ont été creusées et leur volume mesuré à la fois par SfM et par le densitomètre à membrane (Rubber balloon). Le schéma expérimental est donné par la figure 1. La terre extraite a été tamisée à 2 mm et séchée à l'étuve (105°C durant 24h). Cette étape permet de calculer la densité apparente et la densité apparente de la terre fine pour chaque prélèvement.

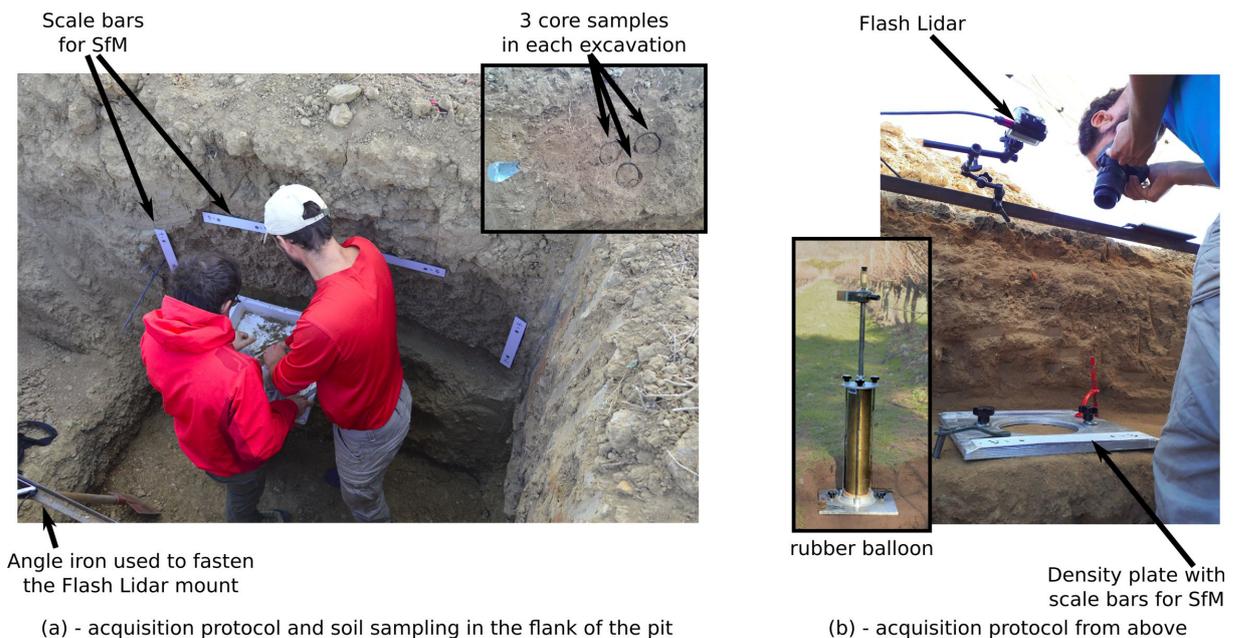


Figure 1 : schéma expérimental sur la face verticale de l'horizon (a) et sur la marche horizontale au droit de l'horizon (b)

Résultats

Mise en oeuvre

L'analyse préliminaire des temps d'acquisition des données sur le terrain montre que le Flash LiDAR et la méthode SfM sont plus rapides que le prélèvement par densitomètre à membrane ou le cylindre et présentent moins de désagréments. Au laboratoire, des procédures automatisées de traitement des images ont été développées sur des logiciels libres et peuvent être menées en routine.

Fiabilité des méthodes testées

Sur l'ensemble des horizons testés, les valeurs de densité apparente mesurées à partir des capteurs sont globalement comparables aux valeurs issues des méthodes traditionnelles. Les valeurs mesurées à partir du Flash LiDAR présentent systématiquement des écarts types beaucoup plus importants que pour les autres méthodes. En effet, la mesure du volume par le Flash LiDAR est plus bruitée et le calcul de la densité apparente est très sensible au volume mesuré. Pour les sols peu caillouteux, la densité apparente mesurée par le cylindre est comparable à celle mesurée par SfM. En revanche, la densité apparente des sols caillouteux est fortement sous-estimée par le cylindre, quand le prélèvement a pu être possible, avec un écart type très important. Le densitomètre à membrane sous-estime systématiquement la densité apparente. La mesure du volume excavé est généralement surestimée du fait d'un écrasement du sol en place par la membrane et imprécise du fait de l'irrégularité du jointement.

Perspectives

La méthode par SfM semble très prometteuse sur plusieurs aspects. D'une part, la précision de la mesure du volume dans des conditions très variées de type de sol, et notamment dans les sols caillouteux, peut permettre de généraliser cette technique. Les répétitions de la mesure in-situ permettent de caractériser la variabilité réelle de la densité apparente de l'horizon, en considérant un écart type de la mesure minimum. D'autre part, la possibilité de moduler le volume investigué en fonction de la porosité que l'on souhaite caractériser est un avantage important. Cet aspect permet d'entrevoir des caractérisations in-situ plus fines des horizons. Enfin, le fait de pouvoir facilement investiguer des horizons caillouteux directement sur la face d'observation des profils est une avancée importante pour l'étude de ces horizons particuliers.

Le Flash LiDAR testé lors de cette étude est plus simple d'utilisation que la SfM mais n'est pas assez précis pour mesurer avec fiabilité la densité apparente du sol. Les évolutions technologiques récentes laissent entrevoir des possibilités d'amélioration de la précision.

- Bauer, T., Strauss, P., Murer, E. (2014). A photogrammetric method for calculating soil bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177, 496-499.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, 363-382.
- Coulouma G, Feurer D, Vinatier F, Huttel O. 2021. Assessing new sensor-based volume measurement methods for highthroughput bulk density estimation in the field under various soil conditions. *Eur J Soil Sci.*; 1–13. <https://doi.org/10.1111/ejss.13115>
- Polyakov, V., Nearing, M., Nichols, M. H., Cavanaugh, M. (2019). An improved excavation method for measuring bulk density of rocky soil using terrestrial LiDAR. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(3), 319-322.
- Scanlan, C. A., Rahmani, H., Bowles, R., Bennamoun, M. (2018). Three-dimensional scanning for measurement of bulk density in gravelly soils. *Soil Use and Management*, 34(3), 380-387.

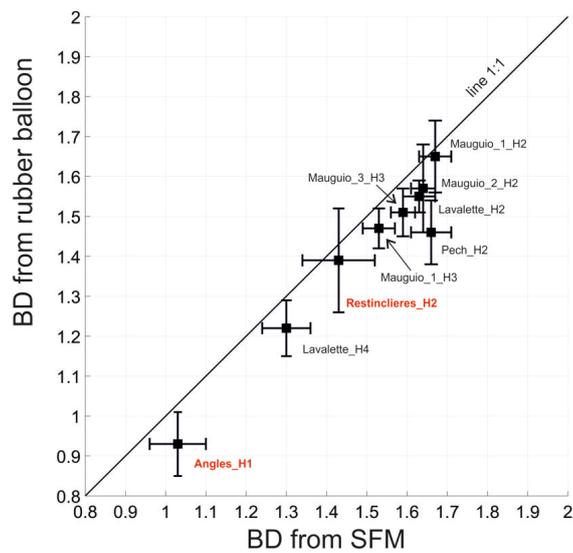
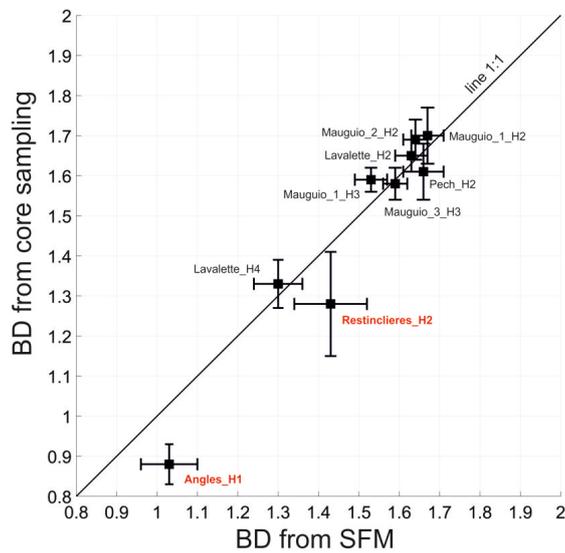
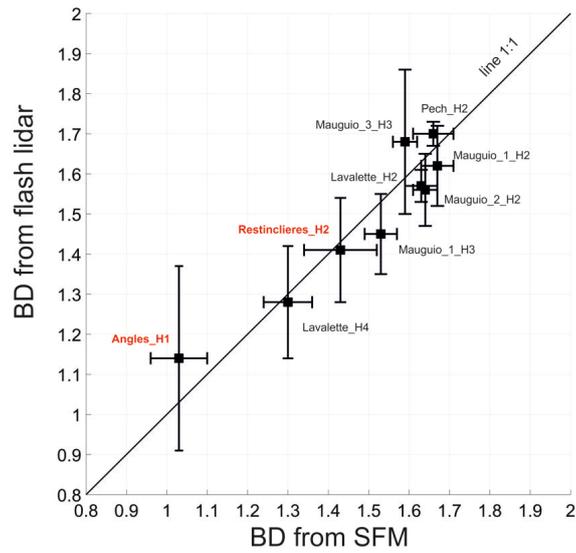


Figure 2 : Comparaison des mesures de densité apparente (BD) de la terre fine sur l'ensemble des horizons caractérisés (en rouge les horizons fortement caillouteux)

Caractérisation hydraulique des sols d'un agrosystème fortement cultivé du bassin arachidier sénégalais en utilisant la méthode BEST

Faye Waly^{1,2,3*}, Orange D.^{3,4}, Diongue D.¹, Do F.⁴, Jourdan C.^{3,5}, Roupsard O.^{3,5}, Fall A.N.^{1,2}, Kane A.^{1,2}, Faye S.¹, Di Prima S.⁶, Angulo-Jaramillo R.⁶, Lassabatère L.⁶

1 : EDEQUE, UCAD, Dakar ;

2 : UMI Résiliences, IRD, Dakar (Sénégal)

3: LMI IESOL, IRD, ISRA, Dakar (Sénégal)

4: IRD, UMR Eco&Sols, U. Montpellier, IRD, CIRAD, INRAe, SupAgro Montpellier (France)

5: IRD, UMR Eco&Sols, U. Montpellier, IRD, CIRAD, INRAe, SupAgro Montpellier (France)

6 : U. Lyon, UMR5023 Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, CNRS, ENTPE, U. Lyon 1 (France)

Mots-Clés : caractérisation hydraulique, agrosystème, infiltration, Bassin arachidier

La gestion efficace des ressources en eau et de la qualité des sols en agriculture dans les zones semi-arides nécessite des informations fiables sur les propriétés hydrauliques des sols et leur variabilité spatio-temporelle. Notre zone d'étude est un agrosystème sahélien avec une économie rurale pauvre basée sur la production vivrière de mil et les cultures de rente d'arachide. Elle est organisée autour d'un système agraire basé sur une combinaison adéquate agriculture-élevage-végétation, dominée par le parc à *Faidherbia albida*. Cet arbre occupe une densité de 3 à 4 arbres/ha, et 3 arbres sur 5 dans les bassins sont des *Faidherbia albida*. La région supporte une forte pression démographique qui est passée de 100 hab/km² en 1970 à plus de 200 hab/km² en 2013. Les quantités de précipitations annuelles varient entre 700 et 500mm avec une forte variabilité interannuelle. Ces facteurs ont entraîné un changement dans l'utilisation des terres et une diminution de la densité des *Faidherbia albida* de 30% par rapport aux années 90, conduisant à une diminution de la couverture du sol. Ainsi, la détermination des propriétés hydrauliques du sol et l'analyse de leur variabilité spatiale fournissent les informations essentielles pour quantifier le flux d'eau dans le sol qui est un prérequis pour l'agriculture. La méthode BEST (Beerkan estimation of soil transfer parameters) développée par Lassabatère et al. (2006) a été appliquée pour fournir l'ensemble des paramètres hydrauliques et la détermination complète des courbes hydrauliques du sol. L'infiltromètre automatique à un seul anneau développé par Di Prima et al. (2016) a été utilisé pour l'acquisition des données expérimentales. La procédure BEST pour la caractérisation hydraulique du sol, permet d'estimer simultanément les courbes de rétention d'eau et de conductivité hydraulique du sol par une simple information expérimentale limitée qui comprend la distribution granulométrique (PSD) du sol, la densité apparente du sol sec, l'infiltration tridimensionnelle cumulée (3D), et les teneurs en eau initiale et finale du sol. L'expérimentation est effectuée sur un transect de 370m de long avec une pente faible de 1% comportant des bas-fonds composés de sols sableux, tandis que le glacis est représenté par du sable plus ou moins compacté. Les variables explicatives testées sont le type de sol, notamment : sol argileux sous l'arbre (CLA) et hors de l'arbre (CLHA), sol sableux sous l'arbre (SA) et hors de l'arbre (SHA), et le sol sableux hors de l'arbre dans le parcours de bétail (SPA) particulièrement compact. La procédure a été répétée 13 fois en respectant les variables explicatives et à proximité de chaque point de mesure, une zone non perturbée du sol a été échantillonnée de 0 à 10 cm et de 10 à 20 cm pour déterminer la densité apparente du sol, la texture du sol et sa teneur en eau initiale.

Chaque infiltration cumulée a été traitée en utilisant les 5 algorithmes de BEST, BEST-slope, BEST-intercept, Best-steady, SSBI et TSBI. Ces méthodes considèrent que la fonction de rétention d'eau est décrite par le modèle de van Genuchten avec la condition de Burdine, et que la conductivité hydraulique est décrite par la relation de Brooks et Corey. Toutes les méthodes BEST considèrent que la teneur en eau résiduelle est nulle, et que la teneur en eau saturée est égale à la

porosité du sol. Ensuite, les données d'infiltration sont utilisées pour dériver la Sorptivité du sol (S) et la conductivité hydraulique du sol saturé, K_s , avant de dériver le paramètre d'échelle pour la pression d'eau, hg .

Les résultats montrent une variabilité spatiale de la conductivité hydraulique du sol à l'échelle du transect (Fig.1). En effet, les valeurs de conductivité hydraulique K_s sont plus élevées pour le sable avec 0,13mm/s par rapport à 0,085mm/s pour l'argile. La conductivité hydraulique sous les arbres semble être significativement plus élevée qu'en dehors des arbres, et évidemment le K_s sous les sols piétinés par le bétail est très faible en raison de la compaction évidente. Ensuite, les sols cultivés sont plus conducteurs que les sols piétinés par le bétail. Enfin, le sable sous l'arbre (SA) est de loin plus conducteur avec un K_s de 0.187mm/s que le sable hors de l'arbre (SHA) avec un K_s de 0.121mm/s. La conductivité hydraulique de l'argile sous l'arbre (CLA) est légèrement plus conductrice que celle de l'argile hors de l'arbre (CLHA) avec des K_s très similaires de 0,089mm/s et 0,082mm/s. Le sable compacté dans le parcours (SPA) est de loin la moins conductrice avec le plus faible K_s 0.063mm/s. Les taux d'infiltration montrent également des différences significatives selon l'emplacement et le type de sol. Le sable sous l'arbre (SA) a le taux d'infiltration le plus élevé avec 14mm/min, suivi du sable hors de l'arbre (SHA) avec 12mm/min. Les sols argileux et les sols piétinés dans le parcours de bétail sont caractérisés par des réponses hydrauliques faibles assez similaires avec des taux d'infiltration moyens respectifs de 7 mm/min pour CLA, 6 mm/min pour CLHA et seulement 5 mm/min pour SPA. Le sable sous l'arbre correspond à un sol plus conducteur avec moins de capillarité, alors que l'argile est moins conductrice et plus sujette à la rétention d'eau par capillarité. Les taux d'infiltration élevés dans les sols argileux à l'extérieur et sous l'arbre peuvent être expliqués par la teneur plus élevée en matière organique observée sur l'échantillonnage.

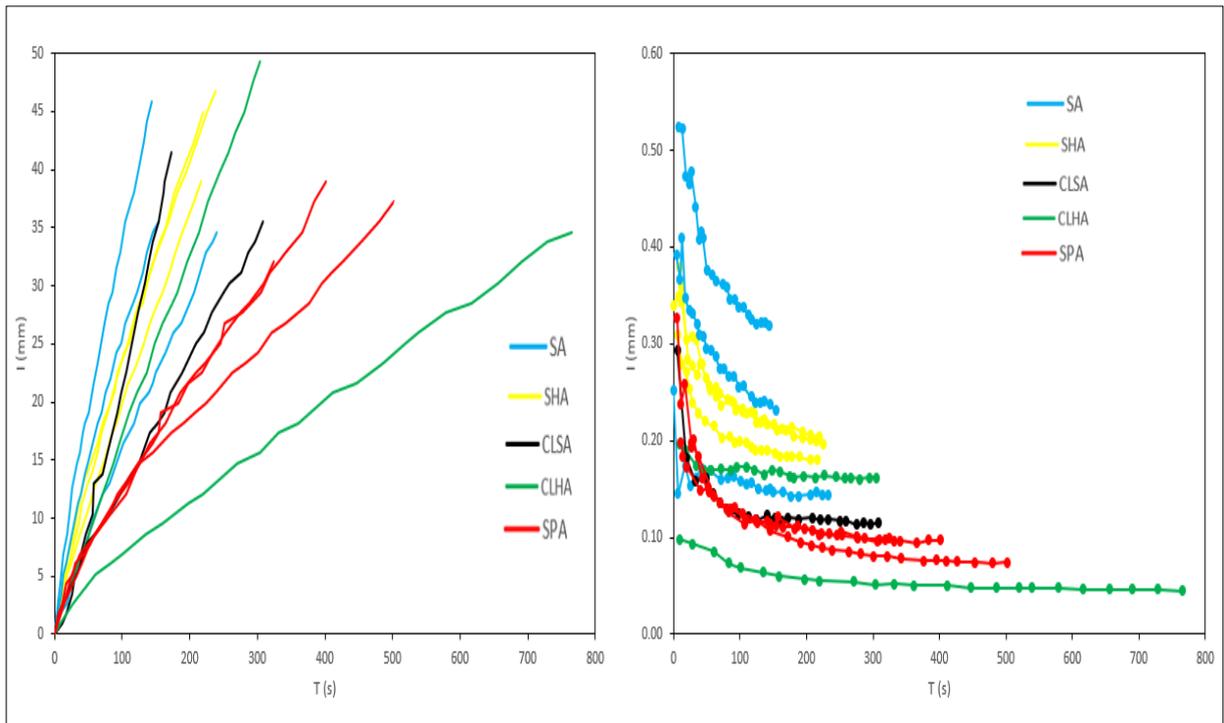


Figure 1 : Infiltration expérimentale cumulée et taux d'infiltration sur les différentes variables explicatives notés sur les sols cultivés de Niakhar

Analyse par tomographie à rayons X de la structure des biopores du sol sous des cycles de humectation et de dessiccation

S. Cheik^{a,b,c}, P. Jouquet^b, J.L. Maeght^{a,b,d}, Y. Capowiez^e, T.M. Tran^a, N. Bottinelli^{a,b}

^a Soils and Fertilizers Research Institute (SFRI), Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Viet Nam

^b Sorbonne Université, UPEC, CNRS, IRD, INRAE, Institut d'écologie et des sciences de l'environnement, IEES, FEST, F-75005 Paris, France

^c Laboratoire de Pédologie, Institut des Sciences de la Vie, Centre d'Étude et de Recherche de Djibouti, CERD, Djibouti, sougueh33@hotmail.fr

^d UMR AMAP, Univ Montpellier, IRD, CIRAD, CNRS, INRAE, Montpellier, France

^e Institut National de la Recherche Agronomique, UMR 'EMMAH', Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09, France

Mots clés : porosité du sol ; galeries ; fissures ; cycles de humectation-dessiccation ; tomographie à rayons X.

Au champ, les sols subissent une succession de cycles de mouillage-séchage. Cette étude a soulevé la question de la dynamique de dégradation de biopores et les conséquences de cette évolution sur la structure du sol. Cette question se pose particulièrement dans un contexte de changement climatique où la probabilité d'avoir de fortes pluies et/ou de longues périodes de sécheresses, pourrait affecter la pérennité des biopores. Une expérience de laboratoire fut réalisée pour exposer les biopores du sol à 3 différents cycles successifs d'humectation (événement pluvieux simulé de 50, 80 et 110 mm h⁻¹ en une heure) et de sécheresse dans un sol argileux. La tomographie à rayons X et les analyses d'images en 3D ont été utilisées avant et après chaque exposition. Les propriétés 3D (volume, diamètre, surface spécifique et densité) des galeries produites par les termites ou les fourmis n'ont pas été statistiquement influencées par la percolation de l'eau de pluie et les cycles d'humectation-dessiccation, ce qui suggère une forte stabilité de ces galeries dans des conditions naturelles. En revanche, la stabilité des fissures était variable et probablement influencée par la présence de galeries dans la même aire. Les résultats obtenus montrent que les biopores peuvent persister dans les sols argileux et qu'il est nécessaire de mieux comprendre comment les fissures et les biopores interagissent. Des travaux complémentaires pourront être réalisés sur d'autres contextes agro-pédo-climatiques notamment dans les sols sableux ou des argiles gonflants de type 2:1 afin de mieux renseigner sur la pérennité des macropores du sol et de ce fait leur fonctionnalité.

Evaluation d'une nouvelle méthode de mesure de la stabilité structurale des sols basée sur une application smartphone.

N.P.A Saby¹, Didier Michot², Blandine Lemercier², Sylvain Busnot², Thierry Morvan², Olfa Tahar², Margot Pelluchon², Mario Fajardo³, Sebastien Salvador-Blanes⁴, Blandine Jabely⁴, Marine Lacoste⁵, Thomas Chalaux⁵, O Josière⁵, H Gaillard⁵, Frédéric Darboux⁶

¹INRAE, USINFOSOL, Orléans, France

²UMR SAS, Institut Agro, INRAE, Rennes, France

³Sydney Institute of Agriculture, School of Life and Environmental Sciences, Faculty of Science, Australie

⁴EA6293 GéHCO – GéoHydrosystèmes Continentaux, Université de Tours, France

⁵INRAE, URSOLS, Orléans, France

⁶Laboratoire Sols et Environnement, INRAE, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Mots-Clés : Stabilité structurale ; RMQS ; SOERE ; mesures ; modélisation.

Introduction

La battance et l'érosion des sols cultivés résultent essentiellement de la désagrégation des mottes de terre et du détachement de fragments sous l'action des pluies. Le comportement physique d'un sol soumis à l'action de l'eau est évalué en réalisant des tests de stabilité structurale. De nombreuses méthodes de mesure de la stabilité structurale ont été proposées, et l'une d'elle a été normalisée après des travaux menés au sein de l'INRAE (« NF-ISO10930-2012. Qualité du sol — Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau », (Le Bissonnais et Arrouays, 1997)).

L'université de Sydney a proposé récemment une nouvelle méthode de mesure de la stabilité structurale (Fajardo et al., 2016), utilisant un algorithme de reconnaissance d'images dynamique, implémenté dans un logiciel pour téléphone portable: *Slakes* (Figure 1). Cette application est ainsi disponible sur les « stores » (Google et Apple). Son protocole est simple et accessible au grand public.

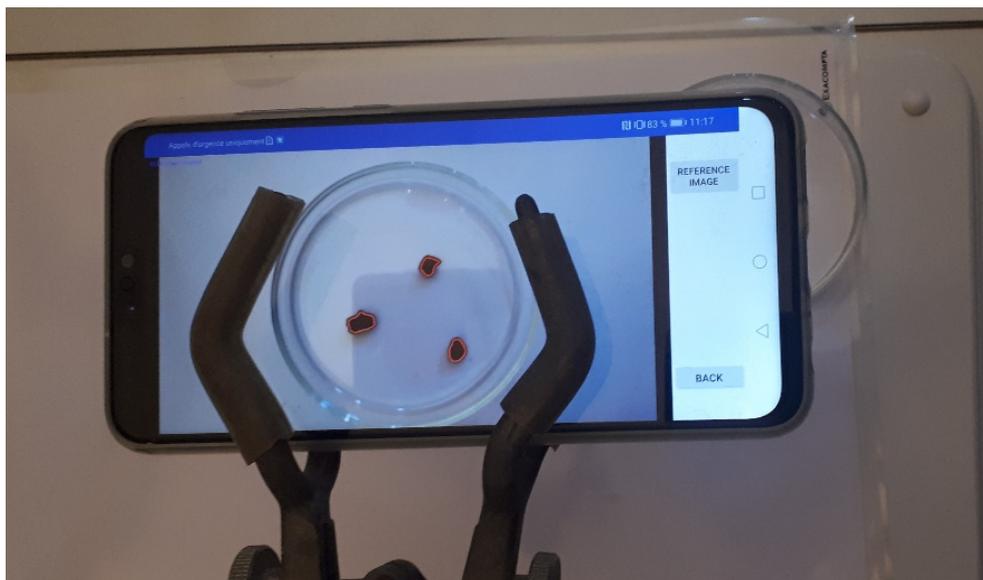


Figure 1. L'application Slakes captant le processus de désagrégation de 3 agrégats dans l'eau.

Les objectifs du projet, dont quelques résultats sont présentés lors de ces journées, étaient les suivants :

- Evaluer la fiabilité des mesures *Slakes* à partir d'essais de répétabilité sur des échantillons bien caractérisés ;
- Evaluer la capacité de *Slakes* à diagnostiquer des situations différentes en terme de pratiques culturales pour des contextes agro-pédologiques et climatiques plus larges que son cadre initial de test (Australie) ;
- Comparer les résultats *Slakes* à des mesures de la stabilité structurale *MWD* selon la méthode normalisée ;
- Rechercher des liens entre la mesure de la stabilité structurale selon les deux méthodes et les propriétés des sols afin d'améliorer les connaissances sur ce paramètre et produire des règles de pédo-transfert.
- Produire une évaluation à différentes échelles (parcelle, région et nationale) de la stabilité des sols
- Proposer un référentiel d'interprétation

Matériel et méthodes

Le projet s'est appuyé sur un ensemble de mesures acquises sur des échantillons provenant de sites contrastés liés à des programmes de recherche : 140 sites du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols répartis sur le territoire métropolitain, 14 parcelles expérimentales du SOERE PRO (Système d'Observatoires, d'Expérimentations et de Recherche en Environnement Produits Résiduaux Organiques) EFELE (EFluents d'ELEvage) situé à Le Rheu, (35), 205 sites du bassin versant de Naizin (35) appartenant à l'Observatoire de Recherche en Environnement AgrHys, 24 sites issus du programme Sols de Bretagne (35, 29, 56, 22), et 50 sites issus d'une parcelle agricole située au sein de l'observatoire instrumenté du bassin versant du Louroux (37), labellisé dans le cadre de la Zone Atelier Loire (CNRS-INEE). Six types de téléphones ont été utilisés pour l'acquisition des données. Trois laboratoires ont été équipés à Orléans, Rennes et Tours pour la mise en œuvre du protocole.

La mesure *Slakes* est réalisée en suivant avec la caméra du téléphone l'accroissement de la surface de trois agrégats plongés dans l'eau. Sur la base du taux d'accroissement de cette surface, deux indicateurs de stabilité structurale sont actuellement utilisés. Le premier (*Asym*) correspond à l'asymptote d'une loi de Gompertz. Le deuxième (*SI600*), plus simple car ne nécessitant pas de modélisation, est directement la valeur du taux d'accroissement au bout de 10 min d'expérience. La gamme de variation attendue des indicateurs s'étale entre 0 et 14 (soit un accroissement de 14 fois la taille initiale de l'agrégat).

La mesure ISO s'est intéressée au test d'humectation rapide et fournit le diamètre moyen pondéré des fragments résultants (*MWD*).

Les liens entre les différentes mesures ont été étudiés à différentes échelles et dans différents contextes pédo-climatiques. Ces mesures ont également été mises en relation avec un ensemble de propriétés du sol et d'informations sur les pratiques culturales à l'aide de modélisation (Cubist).

Résultats et discussions

Le projet a permis de produire un protocole de mise en œuvre de la mesure et d'exploitation des résultats. Un package R a été réalisé pour faciliter l'extraction et la représentation des résultats des mesures.

Aucun matériel spécifique n'est nécessaire pour conduire la mesure. Nous avons pu mettre en évidence un effet du type de téléphone lié sans doute à la qualité du capteur photo et à l'algorithme

de posttraitement implémenté en usine. Par contre, dans une salle du laboratoire aux fenêtres occultées, et en utilisant un éclairage diffus, il n'a pas montré d'influence du poste de travail sur la mesure.

Une des principales différences entre la méthode normalisée et *Slakes* est la quantité d'agrégats utilisée pour mesurer la stabilité structurale. La première méthode utilise au minimum 5 g d'agrégats par mesure, ce qui représente environ 90 agrégats. En supposant qu'il faudrait le même nombre d'agrégats (90) pour avoir une mesure comparable avec la méthode *Slakes*, cela représenterait 30 mesures par échantillon (car 1 mesure *Slake* compte en général trois agrégats), ce qui semble difficile à réaliser. A partir d'un test sur 3 sols différents provenant du site EFELE, nous avons observé qu'il serait nécessaire de mesurer la valeur de *Slakes* sur au moins 10 agrégats (soit plus de trois mesures) et 50 agrégats (soit plus de 16 mesures) pour avoir respectivement un intervalle de confiance à 95% de 1 et 0.5 unité *Slakes*. Cette précision reste encore assez faible car la plupart des sols mesurés ont montré des indices *SI600* ou *Asym* compris entre 0 et 5.

Les premiers résultats confirment une corrélation significative entre les deux mesures *Slakes* et *ISO* ($r = -0.78$ avec les données issues du RMQS) mais la relation montre une moindre corrélation pour certains sols les moins stables selon la norme ISO. La méthode *Slakes* semble en effet moins agressive que la méthode ISO car elle n'inclue aucune action mécanique externe autre que la réhumectation rapide introduisant ainsi des sources de variation entre les deux approches sur ces sols.

Nos résultats montrent également une corrélation importante de la mesure *Slakes* avec la teneur en matière organique. Au niveau national, nous obtenons ainsi $r = -0.63$. Cette mesure est également corrélée avec la texture (sable grossier, sable fin, argile, limon fin) et de manière moins marquée avec la biomasse microbienne, la diversité bactérienne, le fer libre, l'aluminium et le potassium échangeable. Les premiers résultats sur l'établissement d'une fonction de pédotransfert indiquent que l'utilisation du carbone organique, sable grossier, sable fin, argile, limon fin, diversité bactérienne, Mg échangeable, pH, Mn extractible et K échangeable permet de prédire cette mesure avec une précision de 0.78 unité *Slakes*, un biais de 0.67 et un R^2 de 0,76 (en validation croisée).

L'expérimentation sur les parcelles expérimentales EFELE a démontré que la méthode *Slakes* détecte de manière relativement fiable les effets du travail du sol mais pas de la fertilisation, en cohérence avec la méthode ISO, à condition de faire un nombre de répétitions suffisant (15 mesures de trois agrégats environ).

L'utilisation de l'indicateur *SI600* préconisé par Jones et al. (2021) semble donner des résultats statistiques plus fiables que l'utilisation de *Asym* en termes de lien avec les propriétés pédologiques. *SI600* ne nécessite pas d'ajuster la loi Gompertz sur les observations réduisant ainsi l'imprécision liée à l'étape de modélisation.

Conclusions

Les premiers résultats indiquent que l'utilisation de l'application a vocation à être élargie, mais les conditions d'expérimentation particulières (salle fermée avec lumière diffuse) rendent pour l'instant sa démocratisation difficile. Les nouvelles versions de l'application devraient pouvoir intégrer une meilleure gestion de la résolution des photos et des conditions d'éclairage. La constitution d'un indicateur fiable adossé à un référentiel d'interprétation reste encore à consolider. L'utilisation du *SI600* semble prometteuse car elle pourrait simplifier fortement le protocole en évitant le recours à la modélisation de la dynamique de désagrégation. Enfin, des recherches pourraient étudier l'ajout au protocole d'une perturbation mécanique douce afin d'atteindre une meilleure corrélation de *Slakes* avec la méthode ISO.

Références

- Fajardo, M., McBratney, Alex.B., Field, D.J., Minasny, B., 2016. Soil slaking assessment using image recognition. *Soil Tillage Res.* 163, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.018>
- Jones, E.J., Filippi, P., Wittig, R., Fajardo, M., Pino, V., McBratney, A.B., 2021. Mapping soil slaking index and assessing the impact of management in a mixed agricultural landscape. *SOIL* 7, 33–46. <https://doi.org/10.5194/soil-7-33-2021>
- 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. *Eur. J. Soil Sci.* 48, 39–48. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00183.x>

Remerciements : Les auteurs remercient le département Agroécosystèmes de l'INRAE pour son soutien.

Outils de saisie pour la caractérisation des sols

Lionel Bargeot, Eric Matagne, Céline Collin-Bellier, Juliette Constans, Nicolas Chemidlin,

lionel.bargeot@agaricig.com, eric.matagne@agaricig.com, c.collin-bellier@solenvie.com,
j.constans@solenvie.com, nicolas.chemidlin@agrosupdijon.fr

Mots-Clés : saisie terrain, opensource, cloud, web-sig

Le projet TI Dijon Métropole ([TI-Dijon-Métropole](#), Programme d'Investissement d'Avenir ou TIDM) démarré en Septembre 2020, a pour ambition sous 10 ans de « faire de Dijon Métropole la vitrine d'une agriculture performante et durable [...], basée sur des modèles économiques viables pour des productions locales créatrices d'emplois ». Les sols y occupent une place primordiale et constituent un des piliers pour cette transition agricole au travers de l'action "Sols Experts" qui vise à établir un diagnostic de la qualité des sols de l'aire urbaine* de Dijon Métropole (330 000 ha, soit environ 38% du département) en lien avec leurs usages, agronomiques ou urbains, et de développer l'expertise associée. Pour cela, l'action "Sols Experts" s'appuie sur un tableau de bord permettant de caractériser les sols dans toutes leurs composantes physique, chimique et biologique (micro- à macro-biologique) afin de construire le premier référentiel territorial de la qualité des sols s'appuyant sur un échantillonnage intensif à l'échelle du territoire. Pour supporter cet échantillonnage, et faciliter le travail des équipes scientifiques sur le terrain, une méthodologie et un dispositif de collecte des données ont été développés en répondant à plusieurs prérequis : i) utiliser des logiciels et des applications Open Source ; ii) permettre de travailler hors connexion ; iii) être utilisable simultanément sur plusieurs appareils mobiles de saisie gérés par différentes équipes de terrain ; iv) généraliser la remontée et la consolidation des données en évitant de perdre lesdites données en cas de dysfonctionnement du matériel ; v) permettre la visualisation des résultats sous forme d'un web-sig au fur et à mesure de la saisie.

La démarche proposée durant ce projet peut être divisée en six axes de travail pour les deux opérations concernées de l'action Sols Experts. L'opération 1 (opé 1) vise à collecter des données dans un modèle existant (Donesol) ; l'opération 2 (opé 2) vise à créer un nouveau modèle et les formulaires associés. Elles sont détaillées dans la suite de ce résumé.

1/ Le premier axe de travail permet d'élaborer le socle du dispositif. Il s'agit de créer un modèle de données et de l'implémenter dans le moteur PostgreSQL via l'outil de gestion pgAdmin (opération 2). En parallèle, l'import et l'appropriation du modèle de données Donesol (tables de références, sélection des champs utiles en fonction des observations faites sur le terrain par les opérateurs...) a permis de préparer l'opération 1. Pour ces deux bases de données, l'organisation est identique. Elle est composée d'un schéma (équivalent à un répertoire dans la base de données) de terrain, et d'un autre d'agrégation et de consolidation. Leurs rôles sont décrits dans l'axe de travail 5 du dispositif.

Ces éléments ont été mis en œuvre, en concertation avec les acteurs de terrain, acteurs aussi et utilisateurs des appareils mobiles ; cette mise en œuvre s'est faite via des cahiers des charges pour les besoins de l'opération 2, et avec l'aide d'INRAE Infosol pour l'opération 1.

2/ L'axe suivant permet de préparer les formulaires de terrain. Les tables indispensables des bases de données mentionnées précédemment ont été importées dans le SIG Qgis via son Gestionnaire de Base de Données.

La conception et la gestion des formulaires sous Qgis s'est effectuée en choisissant la méthode « Drag and Drop Designer ». Celle-ci consiste, pour chaque champ, à définir le type d'outil (liste

déroulante, case à cocher, photographie...) et ses paramètres tels que : l'alias, les valeurs par défaut, les contraintes de saisie). Le projet finalisé est exporté via l'extension « QField Sync »² afin de créer plusieurs fichiers au format « Geopackage », un format de données géospatiales ouvert, normalisé selon les standards de l'Open Geospatial Consortium^{**} :

- une copie du projet Qgis (.qgs) avec les informations de mise en page, symbologie, formulaires...
- un fichier d'écriture et de stockage des données (.gpkg - geopackage)
- un ou plusieurs fonds de plans (photos aériennes, fond de carte géologique...) (.gpkg - geopackage)

3/ Le logiciel libre d'hébergement de fichiers Nextcloud et l'application cliente Nextcloud sont utilisés pour cette étape. L'installation sur les appareils mobiles fonctionnant sous Android est réalisée via le store F-Droid^{***}.

Chaque appareil possède un compte Nextcloud et un dossier de partage des informations. L'objectif est de mettre à disposition l'ensemble des fichiers finalisés (projet qgis, geopackages) aux cinq appareils mobiles (Trimble TDC600, tablette durcie). En retour, Nextcloud permet également aux appareils mobiles de synchroniser les fichiers initiaux modifiés lors des campagnes de terrain (remontée de données). L'application Nextcloud est également paramétrée pour permettre aux appareils mobiles de transférer les photographies prises sur le terrain dans un dossier de réception spécifique. Un projet Qgis différent est également partagé, dans lequel sont saisies des données d'archive acquises lors de précédentes campagnes d'études pédologiques, menées par Jean Chrétien notamment. (ref Référentiel pédologique de Bourgogne à 1:250000. Régions naturelles, pédopaysages de la Côte-d'Or / par Jean Chrétien).

4/ Les appareils mobiles fonctionnant sous Windows ou Android utilisent respectivement Qgis Hannover et QField Taivaskero pour la saisie de données. Afin de faciliter la prise en main de QField, dont l'interface est différente de Qgis, deux guides d'utilisation ont été élaborés. Pour compléter cette phase et finaliser les formulaires, la journée du 08 mars 2021 a permis aux équipes de terrain de tester les premières étapes du dispositif (accès aux données, utilisation de QField, saisie de données).

5/ Cette étape se concentre sur la remontée des données de l'ensemble des appareils mobiles. La synchronisation est activée par le biais de l'utilisateur de l'appareil mobile (redémarrage pour l'opé 2, connexion à un réseau wifi pour l'opé 1). Les données saisies sur le terrain sont alors transmises à la base de données, dans les schémas correspondants. Le schéma « terrain » est composé des tables modifiées pour chaque appareil mobile. En d'autres termes, si la table « sites » est mise à jour pour cinq appareils mobiles, alors cinq tables « sites » sont créées dans le schéma. Cette manipulation est réalisée à l'aide de connecteurs de données étrangères ou « Foreign Data Wrapper » et de déclencheurs ou « triggers ». Celle-ci propose ainsi de définir un ou plusieurs serveurs de données distants, le ou les utilisateurs concernés pour la connexion aux serveurs puis la création de tables distantes qui contiendront les données des fichiers geopackage. Le schéma « agrégation » permet de stocker des vues. Celles-ci agrègent l'ensemble des données, pour chaque table, de chaque appareil mobile. Les cinq tables « sites » sont fusionnées en une seule table « sites_final ». Enfin, le schéma « consolidation » reprend les vues du schéma « agrégation » pour en faire des tables. Les rendus cartographiques et les rapports s'appuient sur ces données. Ce processus de synchronisation (quotidien et de remontée des données dans la base de données (toutes les 15 min. pour l'opé 2) est entièrement automatisé pour limiter les erreurs et le nombre d'opérations.

6/ La dernière étape du dispositif consiste à créer un rendu sous la forme d'un d'outil cartographique interactif en ligne. Pour réaliser ce webSIG, le logiciel Lizmap, Qgis et son extension Lizmap sont utilisés. Un nouveau projet Qgis, connecté au schéma « consolidation » de

**Qfield est un logiciel SIG simplifié qui fonctionne sur du matériel mobile et qui reconnaît les fichiers générés depuis Qgis.

*** F-droid est une logithèque alternative pour Android

la base de données est élaboré. L'extension Lizmap permet notamment de renseigner plusieurs paramètres de styles et de fonctionnalités (pop-up, tables attributaires, localisation, graphiques...). La mise à jour des données présentées par Lizmap est alors automatique lors de la synchronisation quotidienne des données. L'accès peut être limité via la création de groupes et d'utilisateurs. En complément, des rapports .pdf, générés à partir du composeur Qgis, ont été intégrés dans les popups de chaque site prélevé via un lien de téléchargement.

Bilan :

- une application de saisie dédiée à la collecte des données sur la biodiversité des sols d'ores et déjà testée en contexte urbain et prochainement en contexte agricole et forestier. Cette application est disponible sur github <https://github.com/AgaricIG/BiodivSolMobile>
- une application dédiée à la saisie des descriptions pédologiques au format Donesol. : <https://github.com/AgaricIG/DonesolMobile>
- un dispositif de consolidation des données pour les agréger dans une base de données et les publier via un SIG web et/ou des services de données OGC.

Perspectives :

Le projet TIDM a permis de mobiliser des moyens et des compétences pour développer ces applications de saisie mobile. Si une nouvelle version de l'application BiodivSolMobile sera proposée en septembre pour collecter les données en milieu rural, l'application DonesolMobile ne devrait connaître que des évolutions mineures. Pourtant, de nombreuses améliorations pourraient être encore apportées :

- choix interactif des textures, des éléments grossiers, des codes couleurs
- pré-paramétrage des valeurs par défaut (auteur, étude, triangles de texture)

Enfin une des perspectives les plus intéressantes serait de pouvoir proposer les données pour une capitalisation dans Donesol. Car même si le format est respecté, le dispositif technique permettant l'envoi des geopackages n'existe pas encore.

Dans le cadre de ces JES 2021, nous proposons de présenter ces 2 applications de terrain, en concertation avec les opérateurs. En effet, en Juin 2021, plus de 150 sondages pédologiques auront été saisis *in situ*, avec les avantages et inconvénients que ceci représente de devoir saisir sous ce format. De fait, les opératrices ont pu manquer de liberté dans le choix des commentaires, et nous discuterons comment les développeurs, à l'écoute des opérateurs en temps réel, ont pu fournir une marge de manœuvre pour se rapprocher de la réalité terrain. A l'opposé, afin d'éviter des erreurs de saisie, type numérotation double, ou lettre en lieu et place de chiffres, ils ont bridé les champs, en concertation avec les opératrices. Il s'agit donc d'un rapide retour d'expérience.

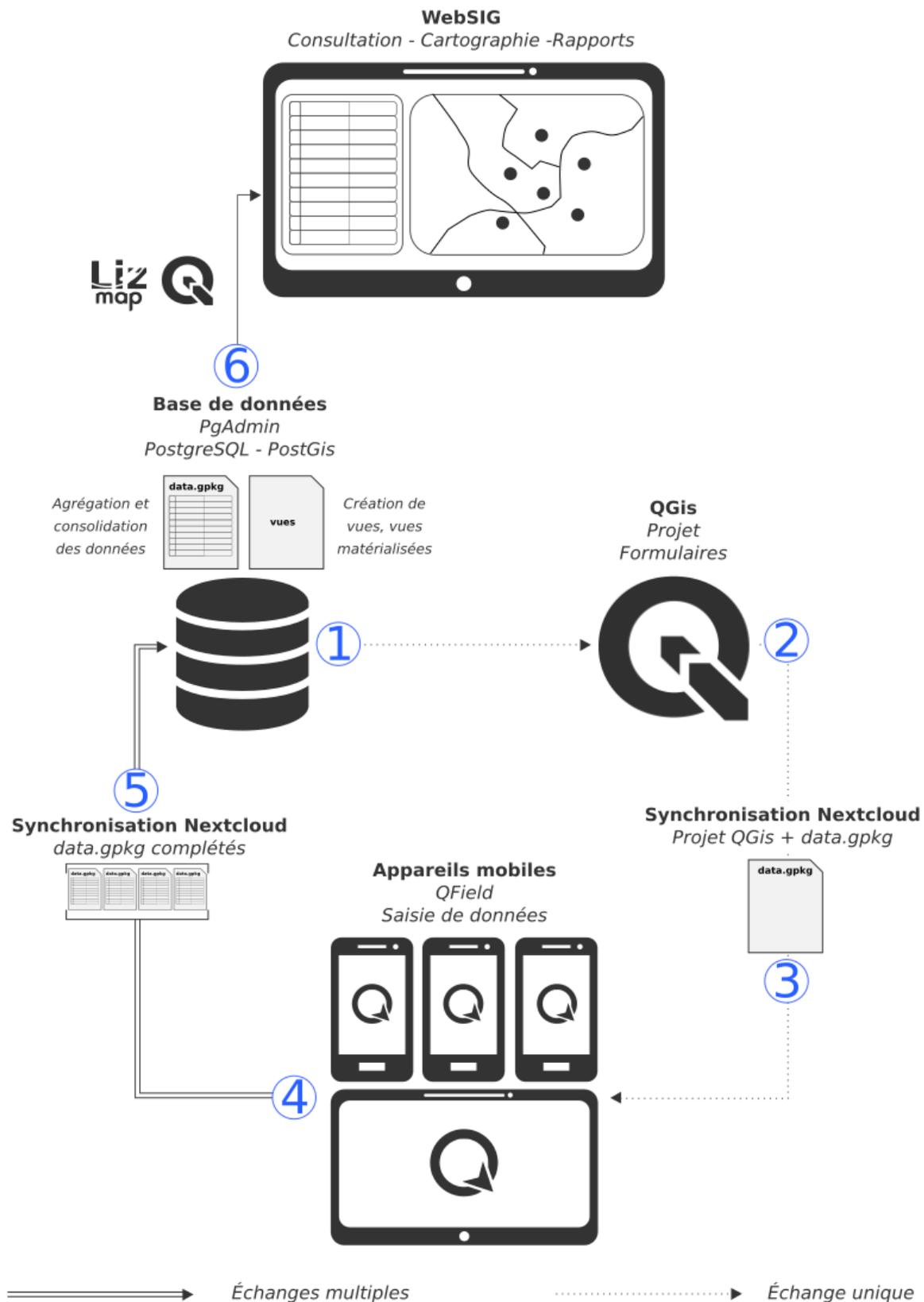


Figure 1 : Dispositif et méthodologie de collecte de données terrains

Une approche de l'agriculture de précision basée sur l'Internet des objets connectés (IoT).

Youssef BERDAI, Hamza BAQA,

Equipe H2T (HybridHub Technology), Incubateur Marseille Innovation - Hôtel Technoptic, Marseille. youssef.berdai@hybridhub.tech

Mots-clés : IoT (Internet des objets), NT(Nouvelles Technologies), Interopérabilité, IA, BlockChain

La future startup H2T (HybridHub Technology) implantée dans le sud a présenté son projet le 13 & 14 Novembre, lors de l'ActinSpace 2020, un événement soutenu par la Région Sud, en partenariat avec le CNES et l'association 3AF (Association Aéronautique et Astronautique de France), à cet effet H2T a su convaincre le jury par l'aspect innovant du projet et a remporté la 2ème place (*) de la hackathon pour avoir développé une plateforme IoT, représentant une nouvelle approche du domaine de l'Agri Tech, car elle offre à ses clients, que ça soit des particuliers ou des entreprises, le pouvoir de surveiller, analyser et valoriser la donnée provenant du milieu agricole avec un engagement sur différents enjeux c.a.d:

I.L'enjeux agronomique: L'enjeu agronomique réside dans le fait que les Nouvelles Technologies (NT) telles que l'IoT et l'IA permettent aujourd'hui aux agriculteurs de mieux s'adapter aux contraintes météo et aux types de sols de leurs parcelles. Le service soilCare de monitoring que propose H2T permettra aux acteurs du monde agricole d'utiliser des capteurs à faible coût pour réduire ,par exemple ,la durée du profilage de l'humidité du sol.

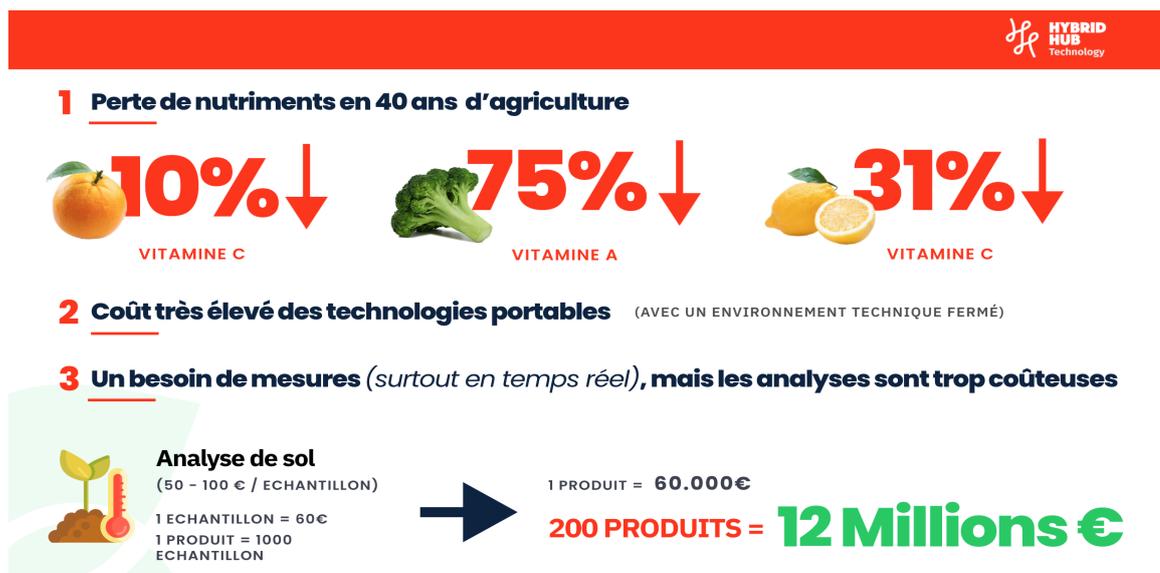


Fig1. Extrait du rapport H2T

La majorité des producteurs se basent principalement sur des modèles génériques, de leurs expériences, des rapports de tests laboratoires très coûteux (**Fig 1.**) pour manipuler le sol et prendre des décisions liées aux engrais (qui constitue 50% des coûts d'exploitation de l'agriculteur) ce qui provoque naturellement une sur-fertilisation ou sous-fertilisation et entraîne une mauvaise gestion du sol à long terme.

II. L'enjeu économique: Pour valoriser économiquement la donnée agricole ,H2T propose le service GreenCash qui va permettre aux clients de vendre leur données aux laboratoires de recherche ou conseil ainsi qu'aux entreprises intéressées, grâce au concept des smart contract basé sur la blockChain.

III. L'enjeu environnemental : Il y a un enjeu environnemental lié à l'utilisation des NT puisqu'elles visent à diminuer l'empreinte écologique de l'activité agricole. H2T n'étant pas experte du domaine des fertilisants, cherche actuellement des partenaires pour élaborer un système d'auto-recommandation de semences et fertilisants basé sur le machine learning (IA) et espère qu' à travers le déploiement de ce service ,qui permet de recommander la formulation NPK adaptée aux cultures de réduire l'impact environnemental par rapport à une application standard, en vue d'éviter une sous ou sur-fertilisation du sol agricole.

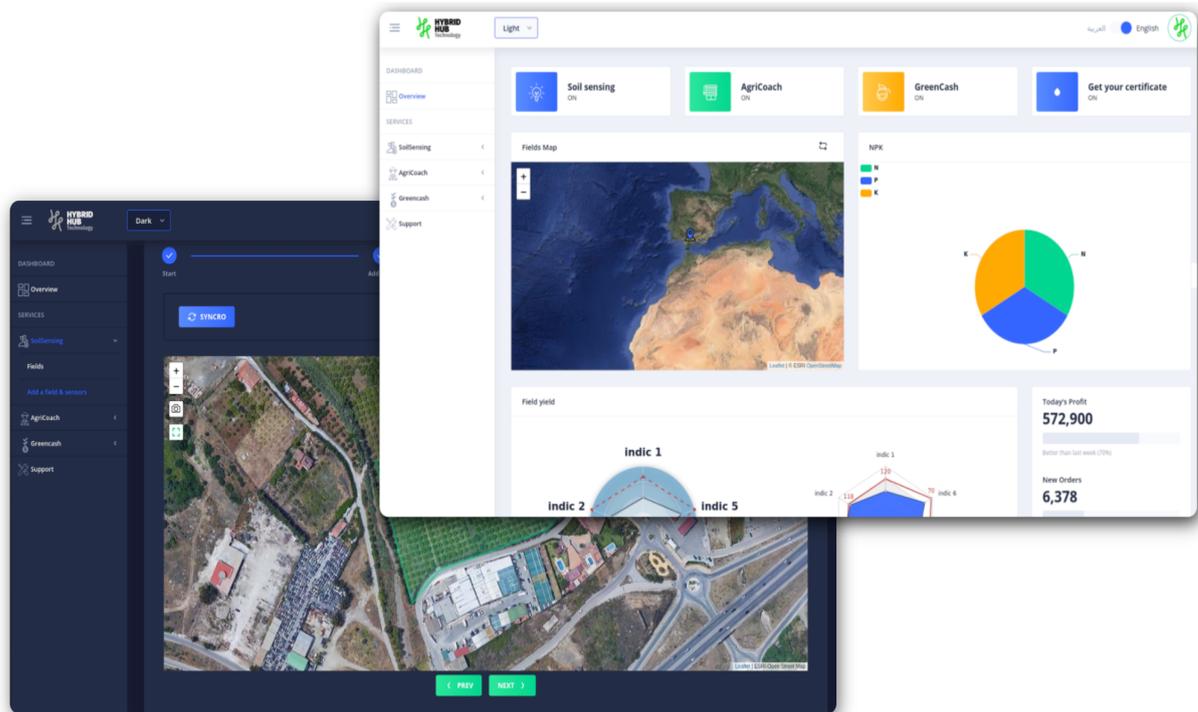


Fig 2. H2T platform

Dans ce sens ,Hybrid Hub Technology (H2T) propose des services numériques basés sur l'IoT (Internet des objets connectés), permettant l'acquisition, monétisation et traitement intelligent des données de l'environnement agricole (qualité de sol,NPK,pH Eau, ...).

Techniquement, comment fonctionne la plateforme H2T ? Il s'agit d'une solution logicielle (**Fig2.**) qui fait le lien entre les équipements du monde agricole et les applications/services. Elle centralise les données provenant de différentes sources : drones, satellites, capteurs IoT, Sigfox et LoRa, contrôleur 4G, etc. pour les unifier et les enrichir dans un référentiel unique. Les données acquises sont ensuite structurées et envoyées dans le bon format à toute application qui en aurait besoin. H2T propose 3 services :

- Soil Care (**Fig 3.**) : une plateforme standardisée, interopérable et sécurisée qui apporte des analyses en temps réel liées au domaine de l'agriculture. Elle combine des flux de données basées sur les technologies de l'internet des objets (capteurs, actionneurs, etc.), ainsi que des imageries de drones et satellites, permettant aux acteurs du monde agricole un suivi en temps réel des différents paramètres liés au sol (NPK, CO, pH, etc.).

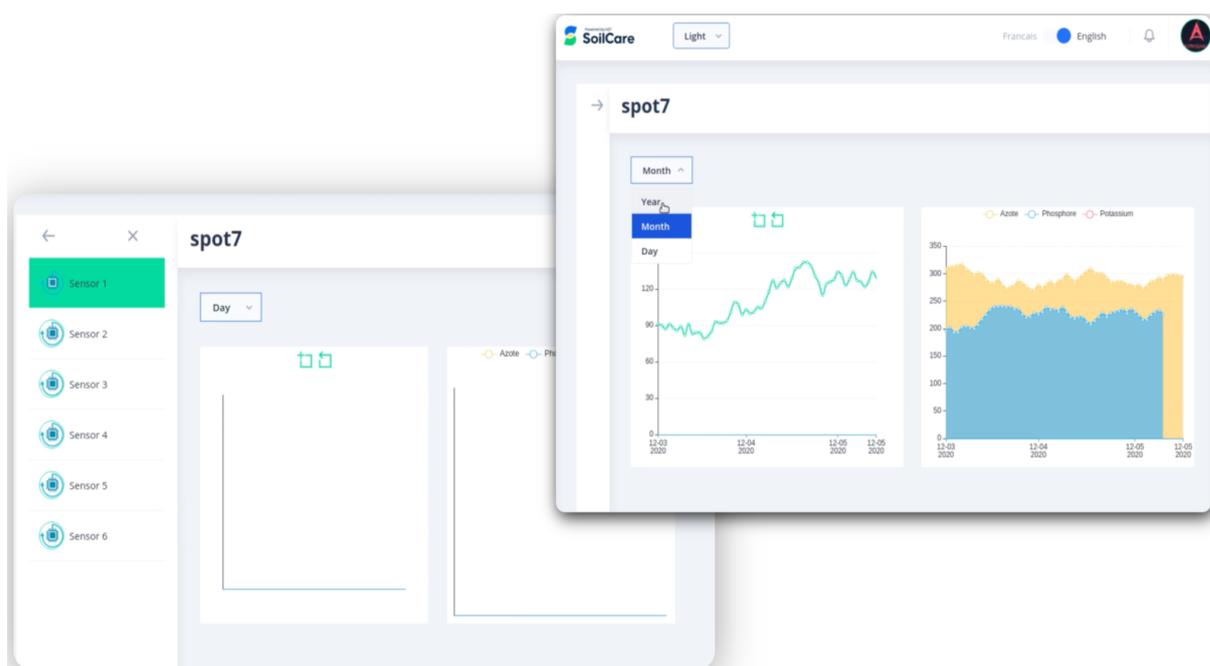


Fig 3. Le service SoilCare.

- GreenCash offre à ses clients la possibilité de monétiser leurs données agricoles grâce au système de Smart Contract basé sur la Blockchain.
- AgriCoach, une solution prédictive basée sur l'IA, offrant aux agriculteurs des recommandations liées au choix des semences et fertilisants

(*) <https://www.maregionsud.fr/actualites/detail/hackaton-actinspace-marseille-24-heures-dinnovation-au-service-des-technologies-du-futur>

**Prédire la teneur en C inorganique d'un sol par spectrométrie infrarouge (MIRS) :
Utilisation du pic d'absorption des carbonates pour sélectionner le modèle de prédiction le
plus approprié**

Cécile Gomez ^{1,2}, Tiphaine Chevallier ³, Patricia Moulin ^{4,5}, Dominique Arrouays⁶,
Bernard G. Barthès ³

¹ LISAH, IRD, INRAE, Institut Agro, 34060 Montpellier, France.

² Indo-French Cell for Water Sciences, IRD, Indian Institute of Science, Bangalore 560012, India

³ Eco&Sols, CIRAD, INRAE, IRD, Institut Agro, 34060 Montpellier, France

⁴ US IMAGO, IRD, BP1386, Dakar, Senegal

⁵ LMI IESOL, ISRA-IRD Bel-Air Center, Dakar, Senegal

⁶ INRAE, US 1106 InfoSol, F45000, Orléans, France

Mots-Clés : Carbonates, spectrométrie dans le moyen infra rouge, régression linéaire, régression multiple, base de données nationales

Le sol, plus grand réservoir de carbone (C) continental, participe au cycle global du C. Deux tiers du stock global de C est organique (Soil organic carbon, SOC), un tiers est inorganique (Soil inorganic carbon, SIC). Les sols carbonatés qui contiennent à la fois du SIC et du SOC sont surtout localisés dans les régions sèches notamment dans les régions méditerranéennes. La compréhension de la dynamique du C organique des sols est un enjeu majeur à la fois pour la fertilité des sols et pour l'atténuation du changement climatique et bénéficie de nombreuses attentions. Cependant les études sur la dynamique de SOC dans les sols carbonatés sont encore peu nombreuses du fait de difficultés analytiques pour différencier teneurs et dynamique du SOC des teneurs et dynamique du SIC. Nos recherches sont motivées par la mise au point d'une méthode rapide, peu chère et précise de la mesure des SIC et SOC en sol carbonatés. Nous présentons ici une étude méthodologique focalisée sur la détermination des SIC par spectrométrie dans le moyen infra rouge (MIRS, 4000-400 cm⁻¹).

La spectroscopie dans le MIR, basée sur l'étude des bandes d'absorption correspondantes aux vibrations moléculaires fondamentales, peut être envisagée pour prédire des propriétés de sol, dont la teneur en SIC (Grinand et al. 2012; Barthès et al. 2020). Ces prédictions sont obtenues via la construction d'un modèle de régression étalonné sur une base de données de d'étalonnage puis testé sur une base de test. Les bases de données d'étalonnage et de test proviennent généralement

toutes deux d'un même contexte pédologique et ont une gamme et une distribution des variables à prédire (e.g., SIC) similaires. Mais les choses peuvent devenir plus difficiles lorsque les deux bases de données (étalonnage et test) proviennent de régions différentes ou ont une distribution ou une gamme différente (Gomez et al. 2020).

Dans ce travail, nous avons utilisé un jeu de données tunisien pour calibrer et valider des modèles de prédiction SIC, et un jeu de données français (issue du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, RMQS) pour les tester. Les deux bases de données présentent une gamme SIC similaire (de 0 à 100 g kg⁻¹) mais différent dans leur distribution. Dans le jeu de données tunisien, la distribution est bimodale avec des modes à 0 et 55 g kg⁻¹. Dans le jeu de données français du RMQS, la distribution est unimodale avec un mode à 0 g kg⁻¹. Les médianes des deux distributions diffèrent donc fortement (48,5 vs. 0 g kg⁻¹, respectivement). La taille des deux jeux de données diffère également (96 vs. 2178 échantillons, respectivement). Dans ce contexte, l'objectif de notre étude est de démontrer l'utilité de 1) classer les échantillons de test (RMQS) en fonction de la hauteur du pic d'absorbance des carbonates à 2510 cm⁻¹ utilisé comme un proxy de leur teneur en SIC, puis 2) de sélectionner un modèle de prédiction approprié en fonction de cette hauteur de pic. Deux méthodes de régression ont été testées : 1) une régression linéaire simple (SLR) utilisant la hauteur du pic de carbonate à 2510 cm⁻¹ comme variable prédictive, appelée modèle *Peak-LR* et 2) une régression multiple des moindres carrés (PLSR) utilisant l'ensemble du spectre MIR, appelée modèle *Full-PLSR* (Figure).

Nos résultats montrent d'une part que le modèle *Full-PLSR* est 1) plus précis que le modèle *Peak-LR* lorsqu'il est appliqué au jeu de données de validation tunisien ($R^2_{\text{val}} = 0,99$ vs 0,86 et $\text{RMSE}_{\text{val}} = 3,0$ vs 9,7 g kg⁻¹, respectivement), mais 2) moins précis que le modèle *Peak-LR* lorsqu'il est appliqué à l'ensemble du jeu de données français RMQS ($R^2_{\text{test}} = 0,70$ vs 0,91 et $\text{RMSE}_{\text{test}} = 13,7$ vs 4,9 g kg⁻¹, respectivement). Sur le jeu de données français RMQS, les prédictions obtenues sur les échantillons pauvres en SIC ont tendance à être plus précises en utilisant le modèle *Peak-LR*, tandis que les prédictions sur les échantillons riches en SIC ont tendance à être plus précises en utilisant le modèle *Full-PLSR*.

Nos résultats montrent d'autre part que 1) la hauteur du pic carbonate (2510 cm⁻¹) peut être utilisée pour distinguer les échantillons test pauvres en SIC et riches en SIC (< 5 vs > 5 g kg⁻¹) et 2) lorsque la hauteur du pic carbonate est > 0, il est préférable d'appliquer la méthode *Full-PLSR* et inversement si la hauteur du pic carbonate est < 0, il est préférable d'appliquer la méthode *Peak-LR*. Ce couplage des 2 modèles *Peak-LR* et *Full-PLSR* en fonction du pic de carbonate donne ainsi les meilleures prédictions sur le jeu de données français ($R^2_{\text{test}} = 0,95$ et $\text{RMSE}_{\text{test}} = 3,7$ g kg⁻¹).

Cette étude a ainsi souligné l'intérêt d'utiliser dans un premier temps un pic de carbonate pour pré-classer les échantillons tests puis appliquer l'approche de régression appropriée en fonction de chaque classe.

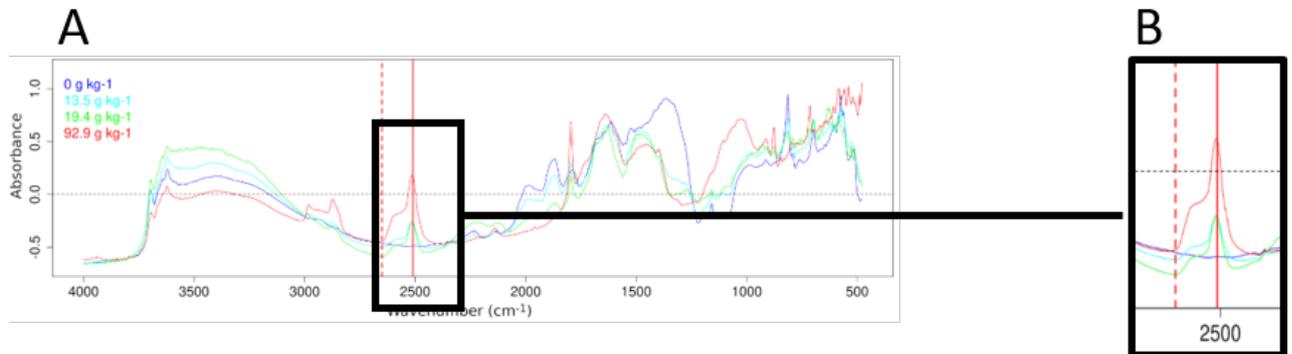


Figure : Deux modèles de prédiction des teneurs en SIC. L'un, la régression multiple (PLSR) utilisant le spectre MIR entière : modèle *Full-PLSR* (A). L'autre une régression linéaire basée sur la hauteur du pic de carbonate à 2510 cm^{-1} : *Peak-LR* (B). Les spectres de couleurs différentes sont les spectres de sol ayant des teneurs variées en SIC (rouge : forte teneur en SIC, bleu teneur en SIC nulle, vert teneurs moyennes).

Références

- Barthès B.G., Kouakoua E., Coll P., Clairotte M., Moulin P., Saby N.P.A., Le Cadre E., Etayo A., Chevallier T., 2020. Improvement in spectral library-based quantification of soil properties using representative spiking and local calibration – The case of soil inorganic carbon prediction by mid-infrared spectroscopy, *Geoderma*, 369, 114272
- Gomez, C., Chevallier, T., Moulin, P., Bouferra, I., Hmaid, K., Arrouays, D., Jolivet, C., Barthès, B.G. (2020). Prediction of soil organic and inorganic carbon concentrations in Tunisian samples by mid-infrared reflectance spectroscopy using a French national library. *Geoderma*, 375, 114469.
- Grinand, C., Barthès, B.G., Brunet, D., Kouakoua, E., Arrouays, D., Jolivet, C., Caria, G., Bernoux, M., 2012. Prediction of soil organic and inorganic carbon contents at a national scale (France) using mid-infrared reflectance spectroscopy (MIRS). *European Journal of Soil Science*, 63 (2), 141-151.

Relations entre les spectres Vis-NIR et les propriétés du sol : application à l'échelle du champ aux horizons de diagnostic de latosols (Brésil)

José F. de Oliveira¹, Michel Brossard², Edemar J. Corazza³, Maria de F. Guimarães⁴, Robélio Marchão⁵

¹Instituto Agronômico do Paraná, Área de Solos, Rodovia Celso Garcia Cid, Km 375, CEP 86047-902 Londrina, PR, Brésil. jfoliveira79@iapar.br

²IRD – Eco&Sols, Montpellier, michel.brossard@ird.fr

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Secretaria de Pesquisa e Desenvolvimento, CP 040315, 70770-901 Brasília, DF, Brésil. edemar.corazza@embrapa.br

⁴Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Agronomia, Rodovia Celso Garcia Cid, Pr 445, Km 380, Campus Universitário, 86051-980 Londrina, PR, Brésil. mfatima@uel.br

⁵Embrapa Cerrados, CP 08223, 73310-970 Planaltina, DF, Brésil. robelio.marchao@embrapa.br

Mots-Clés : Ki, Kr, « reflectance inflection difference », variabilité spatiale, Ferralsol

La spectroscopie Vis-NIR a été utilisée pour proposer des cartographies de sols et de certaines de leurs caractéristiques. Cependant, la discrétisation basée sur les spectres de réflectance des échantillons, et donc des sols, ne permettent pas toujours d'obtenir une bonne corrélation entre les spectres et les distributions spatiales. De plus, les erreurs analytiques augmentent dans la mesure où les modèles de calibration et de prédiction ne se superposent pas.

Les caractéristiques morphologiques, les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques du sol régulent la réponse spectrale des sols. La constitution du spectre et, par conséquent, l'intensité de réflectance et les points d'inflexion de la bande spectrale vont dépendre de ces propriétés. Aussi, la différence d'inflexion de réflectance (DIR, RID en anglais) peut être un bon paramètre pour déterminer la variabilité spatiale des propriétés du sol. Ce paramètre calculé à partir des spectres nous a permis de vérifier qu'il était bien lié, dans la même classe de sols, à la proportion de microagrégats, à la nature minéralogique de la phase solide du sol, et aux contenus en carbone organique (Oliveira et al., 2016).

L'objectif de ce travail est d'évaluer la corrélation spatiale entre le DIR et les propriétés du sol, afin de construire des cartes thématiques à l'échelle du champ, ce qui à notre connaissance n'a pas encore été proposé.

Nous avons travaillé sur des horizons Bw de latosols, horizons caractéristiques et de diagnostic de cette classe de sols ; ce sont des horizons de plus de 0,5 m d'épaisseur à structure microagrégée très fine à fine ; ces sols sont dépourvus de minéraux primaires ; dans la région de l'étude le cortège minéralogique est une association de kaolinite, gibbsite, hématite et goëthite, la texture est souvent argileuse avec une nette tendance à de très faibles proportions de limons.

Dans le cadre d'une parcelle de 375 ha, nous avons échantillonné ces horizons (78 points, grille régulière de pas de 200 m) à la profondeur 0,90 m (tarière, après travaux en profils de sols préalablement étudiés, Oliveira et al., 2013). Les sols avaient été reconnus comme des Latosol rouge-jaune « acrique » (Embrapa, 2006 ou Haplic Ferralsol, IUSS Working Group WRB, 2015) et un Latosol rouge « dystrophique » (Embrapa, 2006, ou Rhodic Ferralsol, IUSS Working Group, 2015).

Les échantillons ont été soumis à 22 déterminations physiques, chimiques et minéralogiques en laboratoire et à l'analyse spectrale, visible et proche infrarouge (Vis-NIR) entre 400 et 2500 nm (FOSS XDS spectrophotometer, Foss NIRSystems/Tecator Infracore International, LLC, Silver Spring, MD, EU). La réflectance a été déterminée tous les 2nm, nous obtenons 1.050 points spectraux.

Les bandes spectrales utilisées pour calculer le DIR (Haberhauer et al., 1998) sont les suivantes (base1/base2): 400-510, 730-930, 1290-1450, 1800-1950, 2000-2218, and 2,218-2,290 nm. L'analyse par grappes (méthode Ward) et l'analyse discriminante (par étapes) ont été utilisées pour observer le nombre de groupes présents dans la zone et identifier la propriété la plus importante pour distinguer les groupes de sols de la parcelle. La variabilité spatiale des propriétés du sol (à partir des scores de l'analyse discriminante) et du DIR a été déterminée par semi-variogramme. Les semi-variogrammes qui montraient une dépendance spatiale ont été ajustés avec les modèles exponentiels, gaussiens et sphériques, en considérant la plus faible somme des carrés du résidu. La corrélation spatiale des scores avec le DIR a été évaluée à l'aide de semi-variogrammes croisés. À partir du modèle géostatistique, une grille régulière avec une résolution de 5 m a été générée pour les groupes de sol observés dans les résultats du dendrogramme et le DIR des spectres, qui ont montré une corrélation spatiale avec les variables discriminantes du sol. Toutes les cartes ont été projetées dans le même système de référence, et les valeurs des groupes de sol et des bandes spectrales ont été échantillonnées dans un tableau de 141.409 pixels, couvrant toute la zone étudiée. La relation entre les groupes de sols (variables catégoriques) et les propriétés spectrales (DIR) a été observée à partir de la régression logistique multinomiale (MLR). Cette méthode a permis de choisir la variable catégorique (groupes de sols pour cette étude) en fonction des caractéristiques des observations (bandes spectrales). La similarité entre les cartes (groupes et attributs spectraux) a été évaluée en fonction de la précision de chaque groupe, de la précision globale, de l'indice Kappa et de la probabilité spatiale.

L'analyse en grappes a permis de détecter trois groupes de sols, 1, 2 et 3 (fig. 1b). Les indices Kr et Ki, respectivement, étaient les propriétés ayant le plus grand poids pour discrétiser les trois groupes, ce qui suggère que chaque indice permettait d'observer la variabilité des sols présents dans la zone.

Kr a différencié le groupe 1 des groupes 2 et 3 et Ki des groupes 2 et 3. La variabilité spatiale du DIR (Fig. 1c) des bandes spectrales entre 730-930, 1800-1950 et 2218-2290 nm a été conditionnée par la variabilité spatiale des microagrégats, et donc par la différenciation minéralogique et morphologique des échantillons de sol, en particulier les indices Ki et Kr et la teneur en argile, qui ont été utilisés pour rechercher les trois groupes de sol dans la zone évaluée. L'augmentation des indices Ki et Kr et de la teneur en argile a diminué les valeurs de DIR des bandes spectrales entre 730-930, 1800-1,950 et 2 218-2,290 nm.

Le DIR associé aux groupes de sol s'est avéré avoir une grande précision (indice Kappa global >0,82) pour cartographier les sols de cette parcelle (Fig. 1c,d). La précision pour chaque groupe de sol était supérieure à 62 %, atteignant 97 %, augmentant dans l'ordre suivant : groupes 2, 3 et 1 (figure 1d). La probabilité de classification correcte était plus élevée pour les groupes 1 et 3, et l'erreur de classification la plus élevée a été observée dans le groupe 2 dans la région centrale de la parcelle (fig. 1d). L'erreur dans le groupe 2 peut s'expliquer par la similitude de la distribution granulométrique entre ce groupe et le groupe 3.

L'hypothèse initiale a été confirmée par la corrélation spatiale entre le DIR des bandes spectrales (730-930, 1800-1950 et 2218-2290 nm) et la variabilité spatiale du sol dans la parcelle étudiée. Cela montre que le DIR de ces bandes spectrales peut être utilisé comme un outil auxiliaire pour construire des cartes thématiques des sols.

Nous pourrions aussi discuter de ces résultats dans une vision taxonomique des sols. Toutefois, pour ce faire il faudrait admettre aussi qu'un certain nombre de caractères morphologiques soient pleinement pris en compte dans les débats actuels sur le sujet.

Notre premier souci au début de ces travaux était la bonne prise en compte des caractéristiques de sols dans un système de terrain assez simple. La haute résolution avec l'approche Vis-NIR est possible, encore faut-il que pour les horizons de surface il soit aussi fait la place aux propriétés intrinsèques de la phase solide du sol pour en retirer tout le potentiel dans une perspective pédologique, agronomique et environnementale.

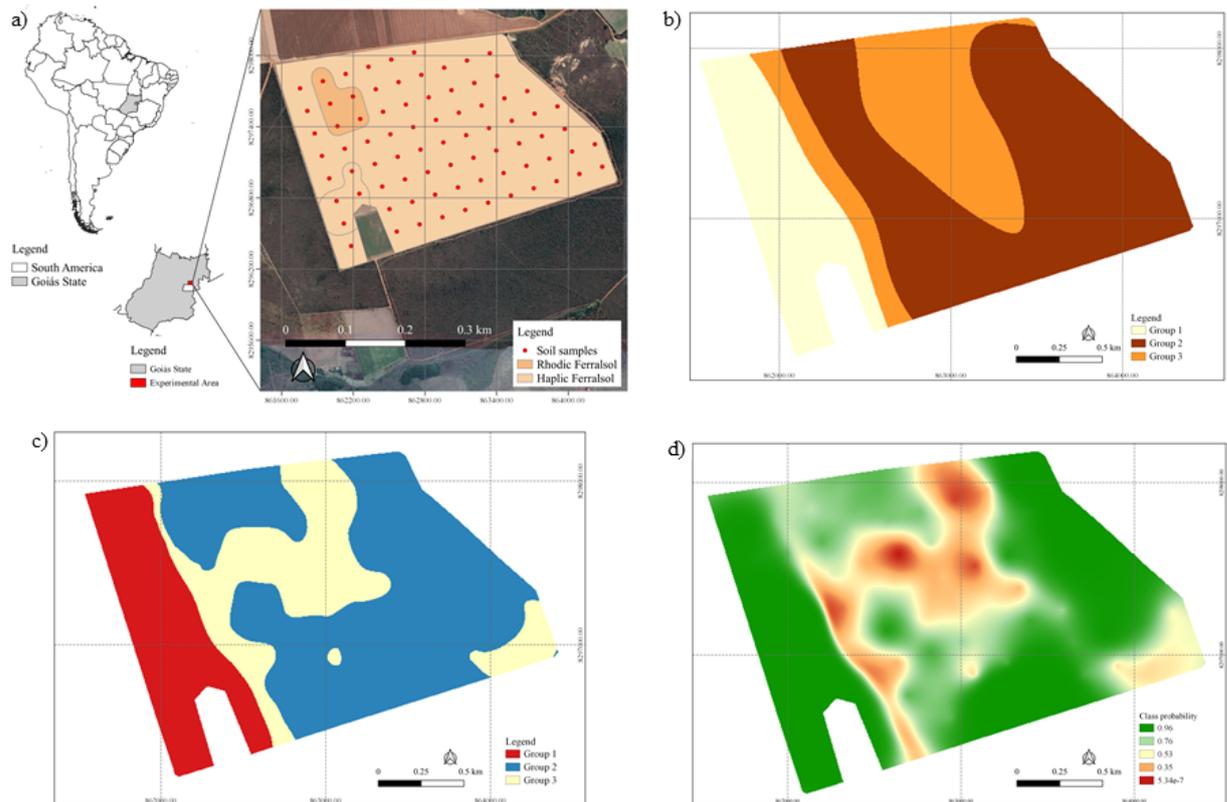


Fig. 1. (a) Localisation des sols selon la taxonomie, (b) groupes 1, 2 et 3 déterminés à partir du cluster et de l'analyse discriminante, (c) groupes observés à partir de la différence d'inflexion de la réflectance (DIR) des bandes spectrales 730–930, 1800–1950, and 2218–2290 nm, et (d) probabilité de l'erreur de classification des groupes de sols à partir de la DIR des spectres..

Références :

- Embrapa, E.B.D.P.A., 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos, Rio de Janeiro: Embrapa Solos. [https://doi.org/ISBN 978-85-7035-198-2](https://doi.org/ISBN%20978-85-7035-198-2)
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome.
- Haberhauer, G., Rafferty, B., Strebl, F., Gerzabek, M.H., 1998. Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy. *Geoderma*. 83, 331–342. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00008-1).
- Oliveira, J.F., Brossard, M., Vendrame, P.R.S., Mayi III, S., Corazza, E.J., Marchão, R.L., Guimarães, M. de F., 2013. Soil discrimination using diffuse reflectance Vis–NIR spectroscopy in a local toposequence. *C. R. Geosci.* 345, 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.12.001>.
- Oliveira, J.F. de, Brossard, M., Corazza, E.J., Marchão, R.L., Guimarães, M. de F., 2016. Visible and near infrared spectra of Ferralsols according to their structural features. *J. Near Infrared Spectrosc.* 24, 243–254. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1202>.

Pédologie spectrale : la spectroscopie moyen infra-rouge pour cartographier les sols de La Réunion.

Myriam Allo^{1,2}, Pierre Todoroff¹, Kenji Fujisaki³, Alain Albrecht³

¹ CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

² ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé, BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

³ UMR Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France.

Mots-clés : Spectroscopie moyen infrarouge ; pédologie spectrale ; classification de sol non supervisée ; cartographie.

La Réunion, département de l'outremer français, est un territoire spatialement hétérogène d'un point de vue pédologique. Cette île volcanique présente une diversité pédologique qui recoupe une grande part de celle des régions tropicales, avec une très grande variété de sols (Ferralsols, Cambisols, Andosols selon la classification WRB). La Réunion, de par son relief accidenté, présente un remarquable gradient d'altération des roches et des cendres volcaniques de haut en bas de la topo-séquence, doublé d'un fort gradient climatique à la fois le long de la topo-séquence mais également entre la côte au vent très humide et la côte sous le vent sèche à semi-aride. En raison de ces gradients d'altération et climatique, la composition physico-chimique et minéralogique des sols est donc très variable. L'existence d'une base de données d'analyses des sols agricoles de La Réunion du laboratoire du CIRAD, comportant près de 46 000 analyses d'échantillons de sols géoréférencés, prélevés entre 1993 et 2017 dans différents systèmes de culture, permet d'approcher la diversité chimique des sols. Cependant, ni la diversité physique ni minéralogique des sols agricoles n'est représentée dans cette base de données.

Or, la préexistence de cette base d'analyses de sol sur ce territoire dont la diversité pédologique et climatique recoupent pour une grande part celles des régions tropicales, semblait être une opportunité pour éprouver un outil simple à fort potentiel pour classifier les types de sols à l'échelle territoriale : la spectroscopie moyen infrarouge (MIR).

En effet, si la spectroscopie proche et moyen infra-rouge permet de détecter les minéraux présents dans un échantillon de sol à travers l'interprétation des signatures spectrales, plusieurs études ont aussi montré l'intérêt de la spectroscopie proche (Demattê et da Silva Terra, 2014; Terra et al., 2018) et moyen infra-rouge (Heil et al., 2019), combinées à des méthodes statistiques de classification, pour caractériser et classier les sols. Cette méthodologie est appelée « pédologie spectrale » par Demattê et da Silva Terra (2014), qu'ils définissent comme étant « une évaluation détaillée et précise des spectres de sol obtenus par 'proximal and /or remote sensing' et analysés selon leurs informations qualitatives (forme, pics d'absorption et intensité) et/ou qualitative pour un échantillon ou un profil de sol, où la convergence des preuves nous guide vers la probable classification du sol » (traduction personnelle).

Un jeu de données de 8 742 analyses d'échantillons de sol géoréférencés de profondeur 0-30 cm et provenant de parcelles agricoles de différents usages réparties sur l'ensemble des surfaces cultivées de La Réunion a été constitué. Parmi ces échantillons, 964 échantillons de sols, correspondant principalement à des parcelles de canne à sucre, et répartis sur l'ensemble des surfaces cultivées,

ont été extraits de la pédothèque du laboratoire d'analyses de sol et broyés à 200 μm . Un spectre moyen-infra-rouge (MIR) a ensuite été acquis avec un spectromètre FTIR portatif Agilent 4300 (Agilent technologies, Santa Clara, CA). Une méthode de classification non supervisée par partitionnement k-medoids sur les spectres MIR prétraités a finalement été appliquée avec la fonction « pam » du package 'cluster' du logiciel R (Maechler et al., 2019). Simple et robuste, cet algorithme permet de former des groupes homogènes (les échantillons sont aussi semblables que possible au sein d'un groupe) et différenciés (les groupes sont aussi dissemblables entre eux que possible) dont les centres de groupes sont des échantillons appartenant au jeu de données. Les échantillons de sols ont donc été répartis en 9 groupes de sol, homogènes d'un point de vue spectral. Le nombre de groupes de sol a donc été choisi par expertise, sur plusieurs critères pédologiques. Afin de délimiter plus finement les contours géographiques des groupes d'échantillons de sol issus de la classification k-medoids des 964 échantillons de sol, nous avons augmenté la densité de points en recrutant les autres échantillons de la base de données d'analyses de sol. Nous avons prédit un groupe de sol pour chacun de ces échantillons via une classification supervisée par apprentissage automatique à partir de prédicteurs liés à la pédogenèse, en utilisant l'algorithme Random Forest (Liaw and Wiener, 2002) à l'aide du logiciel R. Nous avons eu ensuite recours à des polygones de Voronoï pour transformer l'information ponctuelle de groupe d'échantillons de sol sous forme de polygones et ainsi délimiter les contours géographiques d'unités pédologiques.

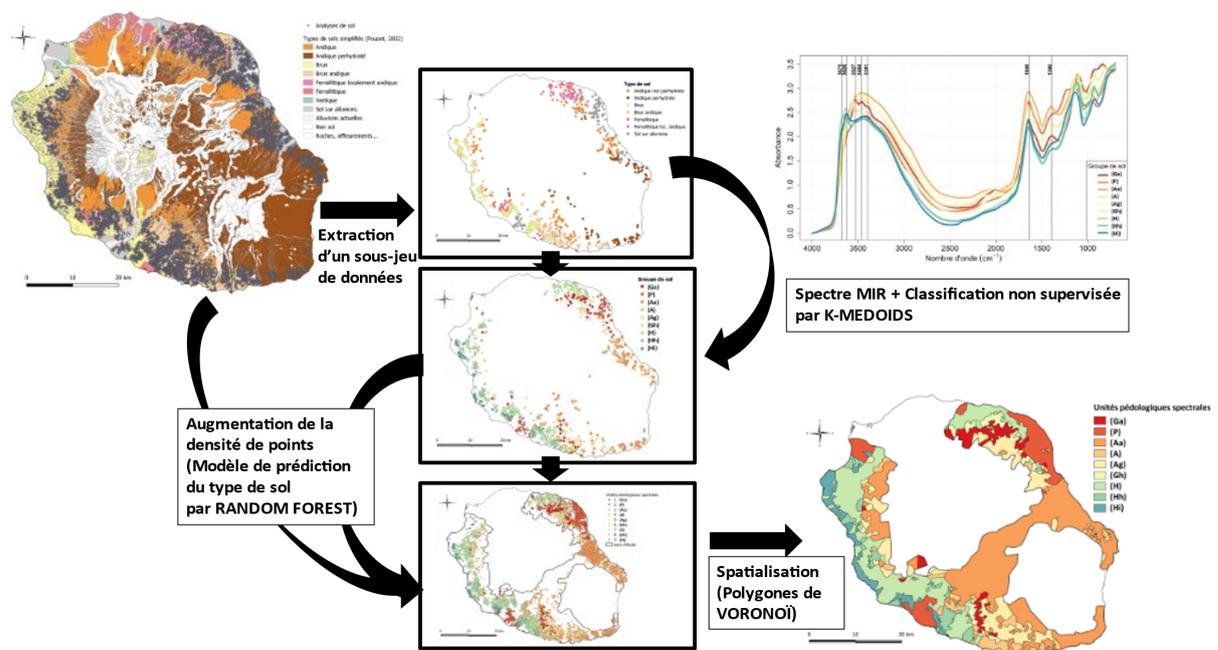


Figure 1 : Schéma de la méthodologie employée pour cartographier des unités pédologiques spectrales sur le territoire agricole de l'île de La Réunion.

L'analyse qualitative des spectres MIR moyens des 9 groupes de sol, couplée à l'ACP des spectres MIR a permis de mettre en évidence les principaux minéraux présents dans chaque groupe de sol et de démontrer que les groupes de sol s'articulent autour de 3 pôles minéralogiques (allophanes, gibbsite, halloysite). L'analyse des propriétés chimiques (teneurs en COS, CEC, pH) des 964 échantillons de sol issues des analyses du laboratoire de La Réunion, tout comme l'analyse des constituants amorphes de ces sols (prédits par spectroscopie moyen infrarouge) montre également une différenciation entre les différents groupes d'échantillons de sol. La nouvelle classification

issue de la pédologie spectrale présente des similitudes spatiales avec la carte morpho-pédologique simplifiée de La Réunion tout en précisant l'information minéralogique.

La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une classification non supervisée (méthodologie appelée « pédologie spectrale »), a ainsi montré sa pertinence pour définir des unités pédologiques avec des informations minéralogiques et organiques distinctes le long d'un gradient d'altération liée à la pédogenèse en zone volcanique tropicale de La Réunion.

Références

- Demattê, J.A.M., da Silva Terra, F., 2014. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. *Geoderma* 217–218, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.012>
- Heil, J., Häring, V., Marschner, B., Stumpe, B., 2019. Advantages of fuzzy k-means over k-means clustering in the classification of diffuse reflectance soil spectra: A case study with West African soils. *Geoderma* 337, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.004>
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2(3), 18--22.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., 2019. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.0.8.
- Terra, F.S., Demattê, J.A.M., Viscarra Rossel, R.A., 2018. Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. *Geoderma* 318, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053>

Cartographie des états de surface des sols en zones sahariennes à l'aide de la télédétection optique et radar. Cas de la région de Guerrara (Algérie).

ZIDI Abdelhakim ^{1*}, ACHAB Mohammed ², DJILI Brahim ¹, MOSTEPHAOUI Tewfik ³,
HAMDI-AÏSSA Baelhadj ^{1,4}

¹ Université de Ouargla, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Laboratoire de Biogéochimie des Milieux Désertiques, Ouargla 30 000, Algérie. zidi.abdelhakim@outlook.com

² Institut Scientifique, Université Mohammed V de Rabat, Maroc.

³ Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Biskra, Algérie.

⁴ UMR ECOSYS, INRA/AgroParisTech, Thiverval-Grignon, France.

Mots-Clés : états de surface du sol, télédétection, cartographie numérique des sols, modélisation, Sahara.

Les progrès actuels de la télédétection fournissent une base fondamentale de données pour l'observation de la surface de la terre, et notamment du sol. L'estimation de l'état de surface des sols est nécessaire pour prendre des décisions appropriées pour une meilleure gestion des terres, particulièrement dans les régions arides où il y a un manque de travaux et de documents de base en lien avec la cartographie des sols. Cette étude vise la cartographie de surface des sols de la région de Guerrara à l'aide des données satellites. La zone de recherche est située dans la région du M'Zab au centre du Sahara septentrional à environ 600 km au sud de la capitale Alger (Algérie). La région de Guerrara (32.790278°N, 4.492222°E et 303m d'altitude) est caractérisée par un climat hyperaride et par des sols alluvionnaires à grand potentiel agronomique et de très haute qualité, par rapport aux autres sols des zones arides. Pour ce fait, un total de 19 schémas de classification a été expérimenté, il en résulte que la combinaison de Random Forest (RF) et du Maximum de vraisemblance (MV) est la méthode de classification la mieux indiquée pour effectuer une cartographie des états de surfaces dans la région de Guerrara, en utilisant les données Landsat 8, Sentinel-2, les indices spectraux et la polarisation VV de Sentinel-1. Ainsi la classification supervisée des pixels des sols par Random Forest a été réalisée sous la plateforme Orfeo ToolBox (OTB) à partir des données des travaux antérieurs et des documents de base utilisés pour l'apprentissage du modèle. L'indice Kappa et la précision globale sont utilisés pour évaluer la performance de la classification. Nous avons obtenu comme résultat 36% de l'état de surface sableux, impliquant les glacis sableux à sable grossier et gravier (ES02), 13% de l'état de surface sableux : impliquant les massifs dunaires à sable fin (ES01), 11% de l'état de surface reg calcaire du plateau Pliocène continental (ES06) et 1% de l'état de surface limoneux (ES04). La combinaison des données satellitaires (Landsat 8, Sentinel-2 et Sentinel-1) a permis d'atteindre une précision globale de 99,82%. C'est ce qui justifie le choix de cette combinaison pour la cartographie des sols dans la région.

1. Introduction

Les utilisateurs du sol et les autorités publiques sont de plus en plus préoccupés par les ressources en sol et leur qualité, en particulier dans les zones arides où les conditions environnementales sont très sévères sur les écosystèmes, les ressources naturelles, les activités économiques et plus généralement sur la sécurité alimentaire des générations futures, pourtant la recherche sur les ressources en sol dans les zones arides est très limitée.

Les progrès réalisés en télédétection offrent aujourd'hui la possibilité de cartographier de grandes surfaces à partir d'images avec une grande précision. Le développement d'algorithmes de

classification performants permet également aujourd'hui de créer des cartes plus cohérentes et plus fiables.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les sols de la commune de Guerrara par une approche cartographique utilisant la télédétection optique et radar.

Ainsi, il s'agira de réaliser une synthèse des travaux de recherche, des documents de base en lien avec la cartographie des sols, puis d'expérimenter plusieurs schémas de classification et enfin de choisir l'approche la plus adaptée pour la cartographie des états de surface des sols de la commune précitée.

2. Matériels et méthodes

2.1. Région d'étude

La commune de Guerrara est située dans la région du M'Zab du Sahara septentrional à environ 600 km au Sud de la capitale Alger et à 110 km au Nord-Est de Ghardaïa (chef-lieu de wilaya). Ses coordonnées géographiques sont 4,127408° à 5,025974° de longitude Est et 32,497799° à 33,013789° de latitude Nord et son altitude moyenne est de 328 m. Elle couvre une superficie de 3359 Km². Elle est limitée au Nord par les communes de Guettara (W. Djelfa) et Hassi Dhelaa (W. Laghouat), à l'Est par la commune d'El Allia (wilaya d'Ouargla), à l'Ouest par les communes de Berriane et Bounoura et au Sud par les communes de Zelfana et El Atteuf.

2.2. Etats de surface

L'ensemble final de classes d'états de surface observées pendant les zones d'entraînements, la calibration et la validation est le suivant:

- Etat de surface sableux : massifs dunaires à sable fin (Dune Sable).
- Etat de surface sableux : glacis sableux à sable grossier et gravier (Glacis).
- Etat de surface sableux à graviers gréseux (Sable Grés).
- Etat de surface limoneux : dépôts d'alluvions limoneuses (Alluvions Limoneux).
- Etat de surface à reg : cailloux, graviers et sable fin (Cailloux Gravier).
- Etat de surface Reg Calcaire (plateau Pliocène continental) (Reg Calcaire).
- Etat de surface rocheux de grés induré à ciment carbonaté (Garas).
- Etat de surface non sol : végétation, eaux de surface, agglomérations, etc. (Non Sol).

Les huit (08) classes étaient sélectionnées en fonction des travaux préexistants dans la région.

Certaines des classes les moins fréquentes ont dû être fusionnées en une seule pour obtenir une meilleure précision.

2.3. Données utilisés

2.3.1. Les données satellites

Les données satellitaires utilisées pour notre étude concernant les données libres d'accès issus des satellites Sentinel 1, Sentinel 2 et Landsat 8.

2.3.2. Les données exogènes

Des données thématiques disponibles telles que les fonds topographiques, la carte géologique au 1/500 000° (1951), la carte de végétation au 1/500 000° (1963), les travaux antérieurs (pédologiques / géologiques) et la base de données pédologique à une résolution de 250m (2017).

D'autres données ont été utilisées telles que le modèle numérique d'altitude de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de résolution 30 m.

2.4. Logiciels utilisés

Pour la réalisation de ce travail nous avons utilisé les logiciels suivants :

- Le logiciel ArcGIS 10.2.2 est un logiciel de SIG qui a été utilisé pour le traitement des fichiers images et données auxiliaires.
- Le logiciel BabelColor CT&A qui a été utilisé pour convertir les couleurs en deux espaces RGB /Munsell (Hue-Value-Chroma).

- Les prétraitements d'images Landsat 8 sont réalisés à l'aide du logiciel ENVI 5.3.
- SNAP (SeNtinel Application Platform) qui a été utilisé pour le traitement des images issues des satellites Sentinel (SNAP 8.0).
- Les classifications d'images sont réalisées à l'aide d'Orfeo-ToolBox (OTB 6.6.1).

2.5. Préparation du jeu de données

2.5.1. Sentinel-1

- Nous avons téléchargé uniquement les produits GRD des images Sentinel-1.
- Une bande S1 avec polarisation VV a été utilisée.
- Nous avons utilisé la boîte à outils ESA SNAP pour prétraiter les images Sentinel-1. Le but principal de ce prétraitement était d'exécuter la correction géométrique des images Sentinel-1 avec la suppression du bruit.
- Les caractéristiques de texture tel que le Contraste, Dissimilarité (DIS), Homogénéité (HOM), Entropie (ENT), etc. ont été calculées à partir de la méthode GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix).
- Après le prétraitement SNAP, les images Sentinel-1 ont été normalisées pour amener les valeurs dans la plage de 0 à 1.

2.5.2. Sentinel-2 et Landsat 8

- Les produits L1C des images Sentinel-2 et L1TP des images Landsat 8 ont été téléchargés.
- Dix bandes S2 ont été utilisées (bleu, vert, rouge, proche infrarouge (NIR), quatre bandes de bord rouge et deux bandes infrarouges à ondes courtes (SWIR)).
- Neuf bandes L8 ont été utilisées (bleu, vert, rouge, proche infrarouge (NIR), une bande panchromatique, deux bandes infrarouges à ondes courtes (SWIR) et deux bandes infrarouges thermiques (TIRS)).
- Dix bandes supplémentaires, couramment utilisées en télédétection : indice d'ombre (SI), indice de couleur (CI), indice de rougeur (RI), indice de brillance (BI), indice des sols nus (BSI), indice de composition du sol en azote et le dioxyde de fer (SCI), ratio des minéraux argileux, carbonate, NDSI et MSAVI2.
- Toutes ces bandes ont été normalisées pour amener les valeurs dans la plage de 0 à 1.

2.6. Approche méthodologique

Dans cette étude, le choix d'une combinaison de schéma de classification utilisant des données satellites et plusieurs indices spectraux a été réalisé pour la cartographie des états de surface dans la région de Guerrara. Ainsi, après avoir effectué une revue des travaux et document de base de la zone d'étude dans le but d'avoir des données d'apprentissage nécessaires pour expérimenter 19 schémas de classification, il s'est avéré que RF($n=50, m=5, k=5, p=50$) offre dans l'ensemble des meilleurs résultats à l'aide des données satellites Landsat 8 (7,5,2), Sentinel-2 (12,8,2) associé à Sentinel-1 (VV) et fusionnées avec LMVM, RCS, HPF et Bayésienne. Par la suite, une combinaison de RF et MV effectuée par la méthode de Dempster-Shafer à l'aide de l'application Fusion Of Classifications de l'OTB. L'organigramme suivant (figure 1) résume les différentes opérations réalisées.

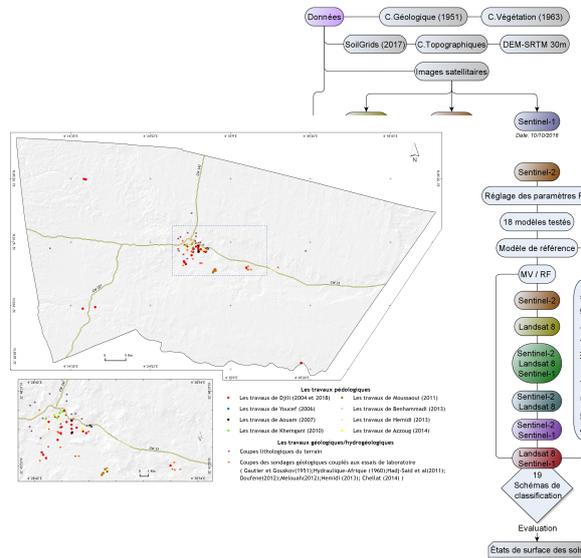


Figure 1. Schéma de la méthodologie adoptée

3. Résultats et discussions

Le schéma de classification 19 donne de meilleurs résultats, tant quantitativement que qualitativement, et ses résultats ont donc été adoptés comme résultat final. Sur la base de la figure 2, qui représente environ 1/10 de la superficie totale de la région de Guerrara, la majeure partie de l'état de surface du sol pour la zone d'étude est un état sableux à raison de 60% ou 13626 hectares, suivie de 11% (2594 hectares) pour le reg calcaire et ensuite de 4% pour un état de surface rocheux. Pour l'état de surface limoneux, cela représente environ 1%, soit 224 hectares.

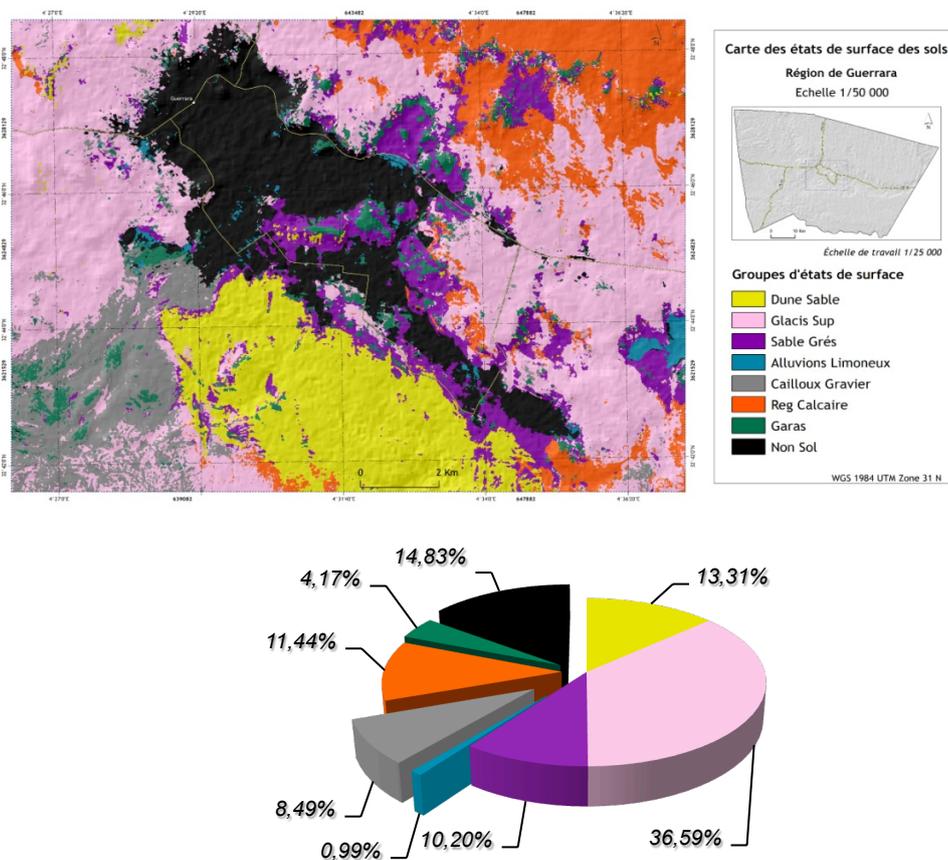


Figure 2. Carte des états de surface des sols dans la région de Guerrara

4. Conclusion

Le choix d'une combinaison d'un schéma de classification utilisant des données satellitaires et plusieurs indices spectraux a été fait pour la cartographie des états de surface dans la région de Guerrara.

La combinaison de Random Forest (RF) et Maximum Vraisemblance (MV) nous a permis d'avoir une très bonne discrimination des états de surface en utilisant L8+S2 + les indices spectraux et la polarisation VV de Sentinel-1.

Une extension de ce travail serait de réaliser une étude physico-chimique et minéralogique de la zone d'étude afin de valider en détail les résultats obtenus. De plus, une exploration d'autres sources de données satellitaires (Aster, Radar en bande X) est envisagée pour des développements futurs.

Références

- [1] - Assami, T., Hamdi-Aïssa, B., Halitim, A., Mostephaoui, T., Rouahana, H., 2014. Apport de la télédétection dans l'étude de la relation entre états de surface et pédopaysages en milieu aride: exemple de la région d'El Outaya (Biskra, Algérie) Algerian journal of arid environment vol. 4, n° 1, Juin 2014: 60-71.
- [2] - Assami, T., Hamdi-Aïssa, B., 2019. Digital mapping of soil classes in Algeria - A comparison of methods. Geoderma Regional Geoderma Regional 15(2019) e00215. 9p.
- [3] - Bousbih, S., Zribi, M., Pelletier, C., Gorraab, A., Lili-Chabaane, Z., Baghdadi, N., Ben-Aïssa, N., Mougnot, B., 2019. Soil texture estimation using radar and optical data from Sentinel-1 and Sentinel-2. Remote Sensing, 11 (13), art. 1520, 20p. 2072-4292.
- [4] - Escadafal, R., 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Études et Thèses, Paris, ORSTOM éditions, 317 p.
- [5] - Hadj-Kouider, M., Nezli, I.E., Hamdi-Aïssa, B., 2014. The role of spectral responses in the Discrimination of soils surface of Sebkhasefioune in the north of Ouargla (northern algeriansahara) by Remote sensing. International Journal of Latest Research in Science and Technology, 3 : 215-220.
- [6] - Hamdi-Aïssa, B., Girard, M.C., 2000. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. Sécheresse, 3: 179-188.
- [7] - Wald, L., Ranchin, T., Mangolin, M., 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. Photogrammetric engineering & remote sensing 63, 6 (1997) 691-699.
- [8] - Zhang, Y., 2004. Understanding image fusion. – Photogramm Eng Remote Sens 70(6): 657-61.

Potentiel des images satellitaires Sentinel-2 au suivi des applications de compost de déchets verts et de fumier en région septentrionale de grandes cultures

Maxence Dodin¹, Hunter D. Smith^{1,2}, Florent Levavasseur¹, Dalila Hadjar¹, Sabine Houot¹ et Emmanuelle Vaudour¹

¹UMR ECOSYS, AgroParisTech, INRAE, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France; maxence.dodin@inrae.fr (M.D.); huntersmith@ufl.edu (H.D.S.); florent.levavasseur@inrae.fr (F.L.); dalila.hadjar@inrae.fr (D.H.); sabine.houot@inrae.fr (S.H.); emmanuelle.vaudour@agroparistech.fr (E.V)

²Agronomy Department, University of Florida, P.O. Box 110500, Gainesville, FL 32611, USA

Mots-Clés : Réflectance, matières organiques exogènes, amendements, Sentinel-2, carbone organique du sol

Actuellement, une attention particulière est portée envers l'impact agroécologique que peuvent avoir les épandages de matières organiques, telles le fumier ou le compost de déchets verts, à l'échelon de paysages agricoles. Surveiller la fréquence et la localité de ces pratiques est un défi majeur, car ces travaux culturaux sont peu répertoriés auprès des organismes de gestion du territoire. Par ailleurs, les séries temporelles satellitaires, telles que Sentinel-2 fournies par l'agence spatiale européenne (ESA), permettent d'étudier les sols agricoles et ont notamment été utilisées pour la prédiction des teneurs superficielles en carbone du sol (e.g. Castaldi et al., 2019 ; Vaudour et al., 2019, 2021). L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel des images Sentinel-2 à détecter les épandages d'amendements organiques, compost de déchets verts et de fumier (bovins et ovins), à deux niveaux d'observation (Dodin et al., 2021) : satellitaire et proximal (figure 1). Au niveau satellitaire, des paires d'images multispectrales de Sentinel-2 ont été analysées avant et après épandage sur six parcelles agricoles de la plaine de Versailles. Au niveau proximal, des mesures de réflectance de terrain ont été répétées au sein d'un dispositif expérimental, à travers 14 traitements, portant sur le type de matière organique (compost de déchets vert ou fumier d'ovin), la quantité épandue (doses à 15, 30 et 60 t.ha⁻¹) et la pratique ou non d'enfouissement. Les spectres de réflectance de terrain ont été acquis le jour de l'épandage (avant et après), ainsi que les 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 37^{ème} jour après l'épandage.

Afin de caractériser les changements spectraux liés à l'épandage, cinq indices spectraux ont été calculés à partir des spectres issus d'images ou bien des spectres de terrain simulés en spectres de Sentinel-2: le *Normalized Burn Ratio 2* (NBR2) issu de la littérature, et les indices *Exogenous Organic Matter Index 1-4* (EOMI1-4), soit adaptés de la littérature, soit nouveaux (Dodin et al., 2021).

Les images de Sentinel-2 ont montré une différence significative entre les spectres des parcelles agricoles avant et après épandage. L'indice EOMI2, qui valorise les bandes spectrales B4 et B12, s'est avéré le mieux adapté au suivi des épandages.

Au niveau proximal, l'indice EOMI4, qui valorise les bandes spectrales B4 et B11, a permis de discerner presque toutes les modalités avec des matières organiques pendant les trois jours qui ont suivi l'épandage, en comparaison du sol nu témoin. Seule la modalité de compost de déchets verts enfoui à 15 t.ha⁻¹ n'est pas apparue significativement différente du spectre de sol nu. Une classification ascendante hiérarchique, appliquée à toutes les modalités à travers le temps et prenant en compte les cinq indices, a confirmé la dissimilarité entre les valeurs d'indices du sol et celles des modalités avec apports de matières organiques exogènes, à l'exception du compost de déchets verts enfoui à 15 t.ha⁻¹. Toutefois, plusieurs modalités, tels que le compost enfoui à 30 t.ha⁻¹ et le

fumier enfoui à 15 t.ha⁻¹ et 30 t.ha⁻¹, n'étaient plus distinguables du sol au 37^{ème} jour suivant l'épandage.

Cette étude ouvre des perspectives pour la cartographie des pratiques d'amendement organique. D'autres enquêtes auprès des agriculteurs sont en cours, afin d'acquérir davantage de données de référence sur ce sujet.

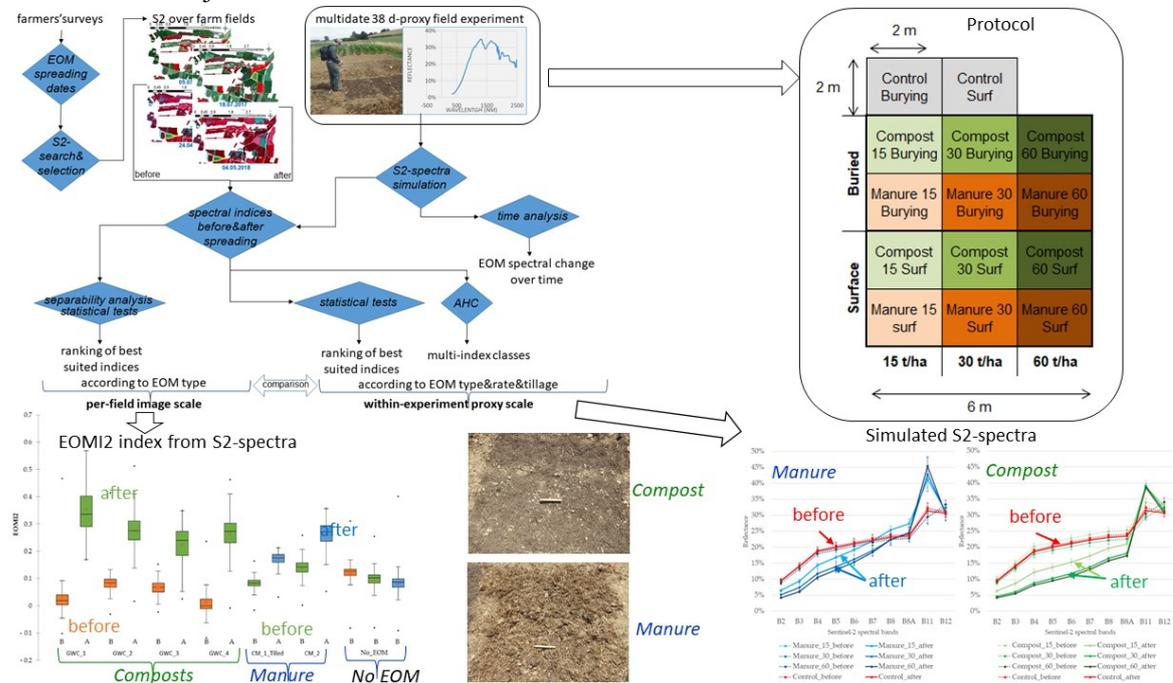


Figure 1 : Résumé de la méthode appliquée et des principaux résultats obtenus lors du suivi d'épandages de compost de déchets verts et de fumier à partir d'images satellitaires Sentinel-2 et de spectres de réflectance (Dodin et al., 2021).

Références

- Castaldi, F.; Hueni, A.; Chabrilat, S.; Ward, K.; Buttafuoco, G.; Bomans, B.; Vreys, K.; Brell, M.; van Wesemael, B. 2019. Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. *ISPRS J. Photogramm. Remote. Sens.*, 147, 267–282, doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026.
- Dodin, M., Smith, H.D., Levvasseur, F., Hadjar, D., Houot, S., Vaudour, E., 2021. Potential of Sentinel-2 Satellite Images for Monitoring Green Waste Compost and Manure Amendments in Temperate Cropland. *Remote Sensing* 13, 1616. doi :10.3390/rs13091616
- Vaudour, E.; Gomez, C.; Loiseau, T.; Baghdadi, N.; Loubet, B.; Arrouays, D.; Ali, L.; Lagacherie, P., 2019. The Impact of Acquisition Date on the Prediction Performance of Topsoil Organic Carbon from Sentinel-2 for Croplands. *Remote. Sens.*, 11, 2143, doi:10.3390/rs11182143.
- Vaudour, E., Gomez, C., Lagacherie, P., Loiseau, T., Baghdadi, N., Urbina-Salazar, D., Loubet, B., Arrouays, D., 2021. Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 96, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102277>

Session 2

« Les matières organiques des sols, caractérisation et dynamique»

2.1 Nouvelles approches de caractérisation des MOS et de leurs dynamiques

2.2 Processus, dynamique et stock des MOS des litières et des sols

2.3 Dynamique des MOS après apports d'amendements - puis un focus phosphore

2.4 Techniques d'analyse, variabilité spatiale et activités microbiennes pour comprendre la dynamiques des MOS selon les pratiques agricoles

Une vision énergétique de la dynamique des matières organiques dans les sols

Pierre Barré¹ & Lauric Cécillon^{1,2}

¹Laboratoire de géologie de l'ENS, UMR 8538 (CNRS-ENS), Univ. PSL, 75005 Paris, France

²Univ. Normandie, UNIROUEN, INRAE, ECODIV, Rouen, France

Mots-Clés : dynamique du carbone, énergie d'activation, analyses thermiques, calorimétrie

Les matières organiques des sols (MOS) constituent la principale source d'énergie pour les micro-organismes du sol. Ces micro-organismes récupèrent cette énergie en oxydant la matière organique qui évolue alors sous forme de CO₂. S'il est reconnu depuis plusieurs décennies que la persistance ou l'utilisation par les micro-organismes de la MOS est une question énergétique, les travaux sur la dynamique des MOS ne considèrent que rarement les contraintes énergétiques de manière explicite.

Dans cette présentation, nous présenterons d'abord des attraits et limites des différentes méthodes permettant d'accéder à l'énergie d'activation de la réaction d'oxydation d'une matière organique ou de la quantité d'énergie libérée par cette réaction. Nous regarderons ensuite si les méthodes de caractérisation énergétique permettent effectivement d'éclairer notre compréhension de la dynamique des MOS. Nous discuterons enfin des perspectives offertes par une vision énergétique de la dynamique des MOS.

**Analyse Rock-Eval® de la matière organique des sols sableux cultivés du centre du Sénégal :
une signature thermique particulière**

Oscar P. Malou^{1,2,6*}, David Sebag^{3,4,5}, Tiphaine Chevallier^{1,6}, Patricia Moulin^{1,7}, Ndèye Yacine Badiane-Ndour^{8,9}, Abou Thiam², Lydie Chapuis-Lardy^{1,6}

¹ LMI IESOL, Centre IRD-ISRA Bel-Air, Sénégal

² Institut des Sciences de l'Environnement, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal

³ IFP Energies Nouvelles, Géoscience, Division, France

⁴ Université de Normandie, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, France

⁵ Institut de Dynamique de la Surface Terrestre, Géopolis, Université de Lausanne, Suisse

⁶ Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRA, Univ Montpellier Montpellier SupAgro, France

⁷ LAMA, Imago, IRD, Centre IRD-ISRA Bel-Air, Sénégal

⁸ LNRPV, ISRA, Centre IRD-ISRA Bel-Air, Sénégal

⁹ FAO, Bureau régional, Sénégal

Mots-Clés : Arenosols ; Carbone organique du sol, Pyrolyse Rock-Eval®, Indices I et R, Stabilité thermique

Le carbone organique du sol (COS), aujourd'hui plus que jamais suscite l'intérêt de la communauté scientifique notamment pour son importance pour la sécurité alimentaire et pour la lutte contre le changement climatique. Le carbone (C) de la matière organique du sol (MOS) est présent sous différentes formes qui diffèrent notamment par leur stabilité thermique. Comprendre la dynamique de ces formes est indispensable pour notre compréhension du cycle de C terrestre. L'objectif de ce travail et d'étudier les effets des pratiques agricoles sur les formes et la stabilité thermique de la MOS dans les systèmes agrosylvopastoraux du bassin arachidier du Sénégal.

Nous avons sélectionné des échantillons (n= 120 ; profondeur 0-10 et 10-30 cm) collectés dans des parcelles cultivées avec des apports de produits résiduels organiques (+PRO) ou de fumier (+Fumier) et des parcelles avec des résidus de mil laissés sur place après les récoltes (+Résidus de mil). Nous avons aussi sélectionné des parcelles sans apports organiques exogènes à l'année N-1 (Sans apport). Enfin, nous avons sélectionné des échantillons (n=10) collectés dans deux sites naturels préservés comme set de référence local.

Cette étude utilise l'analyse Rock-Eval® pour examiner l'impact des apports organiques sur la quantité de COS et la qualité de la MOS dans ces sols sableux cultivés (Malou et al. 2020). Sebag et al. (2016) ont proposé deux indices (I et R) qui intègrent différents pools de C définis par leur température de craquage thermique. L'indice I souligne le degré de décomposition de la fraction organique la plus thermiquement labile et l'indice R met en évidence la contribution de la fraction la plus thermiquement réfractaire de la MOS (Sebag et al. 2016). Dans un diagramme I=f(R), Sebag et al. 2016 mettent en valeur une droite de tendance construite à partir de sols tropicaux de situations contrastées (Ferralsols du Gabon). Cette droite de tendance est utilisée comme modèle de référence dans cette étude.

La matière organique du sol dans ces Arenosols, bien qu'affectée positivement en termes quantitatifs par les apports organiques, est dominée par des formes thermiquement labiles. Nos résultats montrent par ailleurs que dans les Arenosols cultivés du bassin arachidier du Sénégal, l'indice I augmente avec la profondeur contrairement aux observations dans d'autres types de sol. Le pool de C hautement réfractaire (A5) mesuré dans les Arenosols du Sénégal représente 7,7 à 21,3% du carbone total dans la couche de 0-10 cm, et 12,5 à 24,3% dans la couche 10-30 cm. Ce résultat met en évidence la stabilisation du COS avec la profondeur du sol. Le pool de carbone thermiquement réfractaire est relativement plus abondant dans les sols sableux étudiés

comparativement aux Ferralsols (2-9%). Par ailleurs, la projection des valeurs de I et R des Arenosols sur le diagramme I=f(R) (Figure 1) montre qu'elles présentent un décalage par rapport à la droite de tendance proposée par Sebag et al. (2016). Ce résultat s'explique par un enrichissement relatif de la contribution des pools les plus réfractaires qui sont 2 à 3 fois plus importants dans ces Arenosols comparativement aux sols de référence. Dès lors, on peut calculer un ΔR comme étant l'écart de l'indice R pour les Arenosols du Sénégal par rapport à la droite de tendance. Ce ΔR est une façon de qualifier la qualité réfractaire de la MOS. Cette nature particulièrement réfractaire des MOS des Arenosols du Sénégal s'explique par une minéralisation intense du COS car les pools de stabilité intermédiaire sont rapidement minéralisés dans ces sols cultivés au profit du compartiment A5.

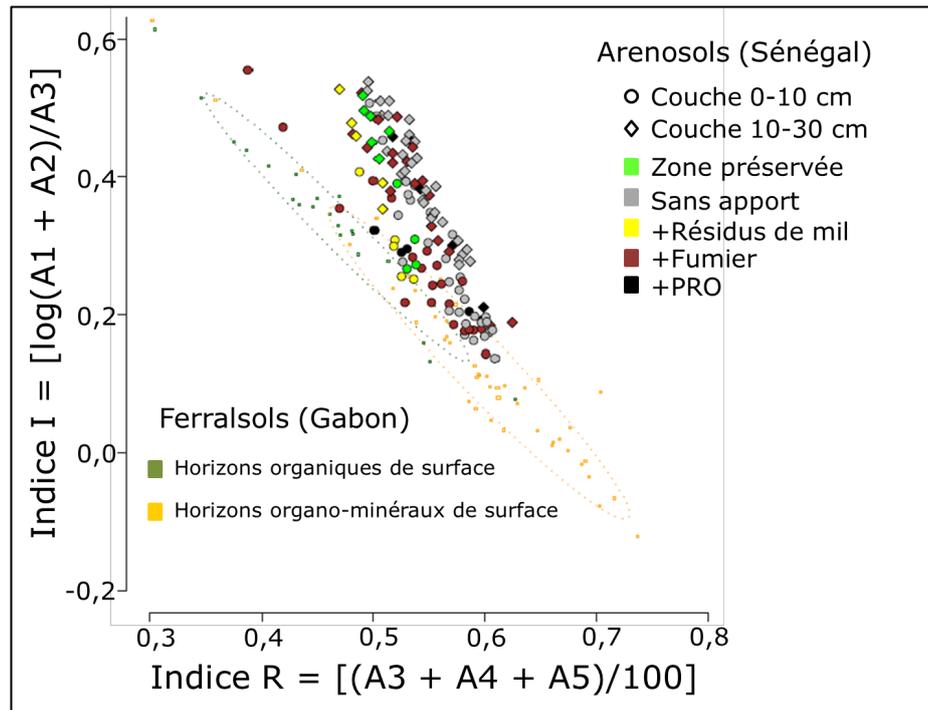


Figure 1 : Indices R vs I dérivés de la pyrolyse Rock-Eval[®] des Arenosols du Sénégal et comparés au modèle dérivé des Ferralsols du Gabon utilisé comme référence externe Sebag et al. (2016).

Références

- Malou, Oscar Pascal, David Sebag, Patricia Moulin, Tiphaine Chevallier, Ndeye Yacine Badiane-Ndour, Abou Thiam, et Lydie Chapis-Lardy. 2020. « The Rock-Eval[®] Signature of Soil Organic Carbon in Arenosols of the Senegalese Groundnut Basin. How Do Agricultural Practices Matter? » *Agriculture, Ecosystems & Environment* 301 (octobre): 107030. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107030>.
- Sebag, David, E. P. Verrecchia, L. Cécillon, T. Adatte, R. Albrecht, M. Aubert, F. Bureau, G. Cailleau, Y. Copard, et T. Decaens. 2016. « Dynamics of soil organic matter based on new Rock-Eval indices ». *Geoderma* 284: 185-203.

**Application de la tomographie RX à l'analyse structurale des composantes d'un sol :
macroporosité, réseau racinaire et nécromasse**

Clementine Chirol^{1,2*}, Kate L. Spencer², Simon J. Carr³, Iris Möller⁴, Ben Evans⁵, Jason Lynch⁶,
Helen Brooks⁵, Kate Royse⁷

¹Laboratoire Sols et Environnement, Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54518
Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France

²School of Geography, Queen Mary University of London, Mile End Road, London E1 4NS, UK

³University of Cumbria, Rydal Road, Ambleside LA22 9BB, UK

⁴Department of Geography, Trinity College Dublin, Museum Building, Dublin 2, Ireland

⁵Department of Geography, University of Cambridge, Downing Place, Cambridge CB2 3EN, UK

⁶Department of Geography, University College London & Zoological Society of London, Gower
Street, London, WC1E 6BT, UK

⁷British Geological Survey, Nicker Hill, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, UK

Mots-Clés : Tomographie RX, Structure des sols, Macroporosité, Réseau racinaire, Nécromasse

Les caractéristiques structurales du sous-sol, et en particulier les interactions entre la macroporosité, les racines et autres éléments organiques, ont un impact fort sur le fonctionnement du système sol et la dynamique du carbone. Des avancées récentes ont été faites dans l'utilisation de la tomographie RX pour visualiser et quantifier la structure des sols agricoles. Cependant, l'application de cette technique aux sols plus hétérogènes des forêts et des zones humides demeure un défi technique important.

Dans cette étude, nous développons une nouvelle approche d'analyse d'images issues de la tomographie RX pour quantifier la macroporosité, les racines et la nécromasse d'un sol complexe à une résolution de $62.5 \mu\text{m}^1$ (Figure 1). En particulier, l'usage du filtre de Frangi, un filtre multi-échelles rehaussant les structures tubulaires, permet d'améliorer la détection des racines fines. Nous prenons l'exemple de huit sols de plaine littorale, échantillonnés en triplicats, et caractérisés par différentes textures (sableux / argileux) et couvertures végétales (sol nu, *Spartina spp*, *Salicornia spp* et *Puccinellia spp*) pour capturer la complexité structurale des sols littoraux. Les composantes des sols sont décrites à l'aide d'indices structuraux (volume, épaisseur moyenne, connectivité, densité de répartition, caractéristique d'Euler-Poincaré) pour les corrélérer aux propriétés géochimiques et géotechniques du sol, telles que le taux de matière organique, le taux d'argiles et la résistance au cisaillement.

Nous décrivons certaines interactions notables entre la macroporosité et les racines, ainsi que leurs impacts sur le fonctionnement du sol. La morphologie des macropores est contrôlée par la structure du système racinaire (fibreuse ou pivotant) et par la bioturbation : la présence de systèmes racinaires pivotants est liée à une plus grande épaisseur et une meilleure connectivité des macropores. La stabilité structurelle de ces macropores est ensuite déterminée en grande partie par la texture du sol : les macropores sont mieux préservés dans les substrats argileux, notamment au cours des épisodes de peuplement et de mortalité qui affectent les plaines littorales.

Un large réseau connecté de macropores améliore le drainage et peut favoriser la croissance des plantes, mais diminue la résistance du sol au cisaillement. Cela pose la question de la pérennité du stock de carbone dans ces sols soumis à l'érosion littorale. Les structures racinaires fibreuses, par contraste, augmentent la résistance du sol au cisaillement, non seulement par des processus directs comme l'augmentation de la force de tension et une moindre contribution à la macroporosité du

sol, mais aussi par des processus indirects tels que de plus grands apports de matière organique dans les sols, ce qui augmente leur cohésion.

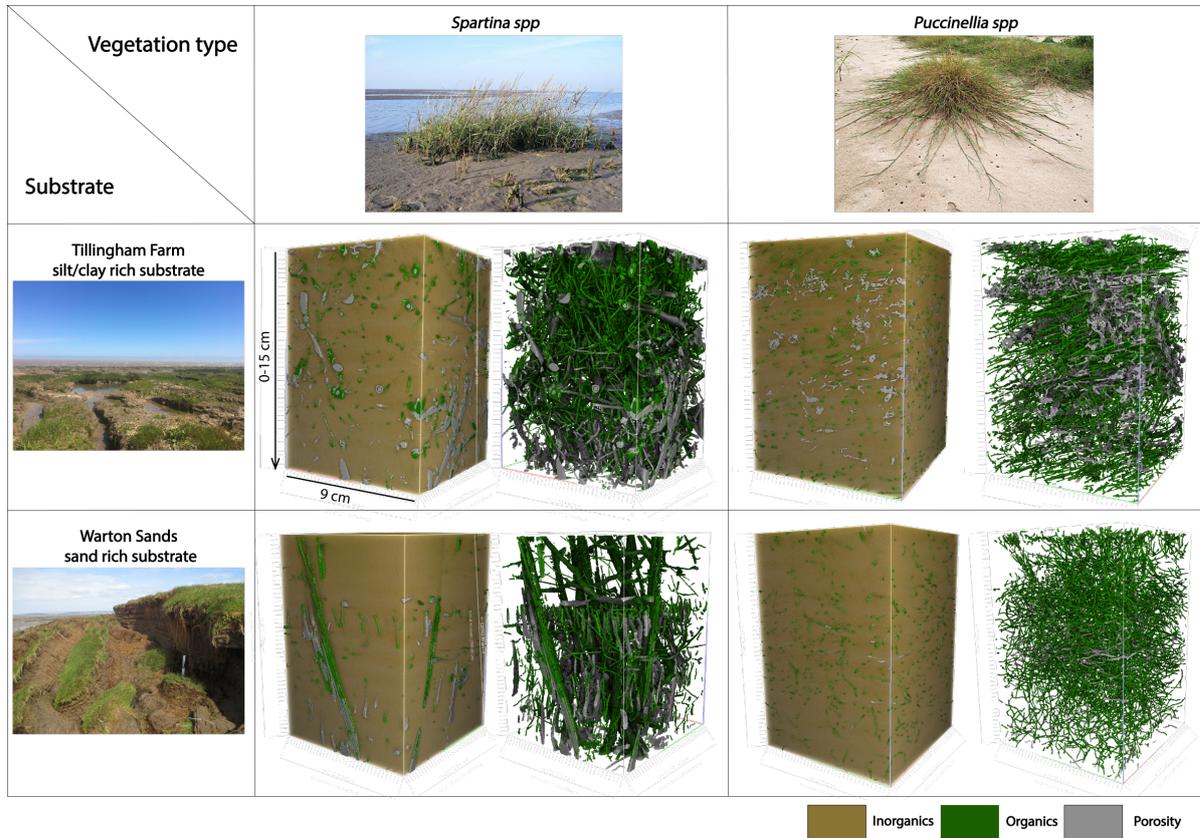


Figure 1 : Volumes 3D issus de la tomographie RX montrant l'organisation des macropores et des éléments organiques dans des sols de plaine littorale caractérisés par différentes textures (argileux / sableux) et espèces végétales dominantes (ici : *Spartina spp* à système racinaire pivotant et *Puccinellia spp* à système racinaire fibreux). Les carottes de sédiment de 15 cm de profondeur et 15 cm de diamètre ont été scannées intactes, puis redimensionnées en volumes de 15 cm de hauteur et 9 cm de côté pour retirer les perturbations aux bords.

En nous basant sur ces observations, nous discutons des potentielles applications de la méthode dans de futurs projets. En effet, la tomographie RX permet une quantification plus rapide, semi-automatique, et potentiellement plus robuste de la biomasse apportée par les racines fines. Pouvoir visualiser la répartition tridimensionnelle du système racinaire et distinguer les racines vivantes de la nécromasse permettraient également une meilleure compréhension de la dynamique de la matière organique dans les sols.

Référence

Chirol, C., Carr, S. J., Spencer, K. L. & Moeller, I. Pore, live root and necromass quantification in complex heterogeneous wetland soils using X-ray computed tomography. *Geoderma* 387, 114898 (2021).

Imagerie chimique des associations organo-minérales du sol à l'échelle nanométrique.

Floriane Jamoteau^{1,2}, Nithavong Cam¹, Clément Levard¹, Adrien Boulineau^{3,4}, Jérôme Balesdent¹, Emmanuel Doelsch², Jérôme Rose¹, and Isabelle Basile-Doelsch¹

¹Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France ;

²CIRAD, UPR Recyclage et risque, F-34398 Montpellier, France ; ³Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France ; ⁴CEA, LITEN, 17 Rue des Martyrs, F-38054 Grenoble, France ;

Mots-clés : mécanismes de stabilisation du carbone, matière organique, microscopie électronique à transmission, Andosol.

Les associations organo-minérales sont à l'origine de la stabilisation des matières organiques (MO) du sol, mais les mécanismes contrôlant leurs dynamiques ne sont pas encore totalement connus à l'échelle micro et nanométrique. Le point de vue prédominant des processus de stabilisation des MOS est l'adsorption de la MO sur les surfaces minérales (Kleber et al., 2007), mais comme suggéré par Basile-Doelsch et al. (2015), l'altération minérale, qui peut générer des nanophases amorphes et des oligomères cationiques sur les surfaces minérales, est également un moteur de la stabilisation de la MO par des processus de coprécipitation. Des expériences de laboratoire mimant ces processus ont montré que les coprécipités nanométriques (Nanosized Coprecipitates of inorganic oLIgomers with organiCs : nanoCLICs) sont constitués d'oligomères inorganiques de Fe, Al, Si associés à des molécules organiques (Tamrat et al., 2019). Les andosols sont connus pour avoir une forte capacité de stabilisation de la MO, principalement attribuée aux associations de la MO avec des nanominéraux (imogolite, allophane, proto-imogolite) (Basile-Doelsch et al., 2007 ; Levard et al., 2012). Dans la présente étude, nous avons étudié la présence de nanoCLICs dans les fractions d'andosol de La Martinique. Nous avons utilisé la microscopie électronique en transmission (TEM, FEI Tecnai Osiris 200kV) couplée à 4 détecteurs EDX et EELS pour semi-quantifier et cartographier les éléments majeurs. Les zones d'intérêt analysées par TEM variaient de 5 µm à 10 nm avec une taille de pixel de 500 à 1 nm. Malgré quelques minéraux cristallisés, de la MO particulaire et de fines fibres amorphes (potentiellement des nanotubes d'imogolite), nous avons principalement observé des phases amorphes en diffraction électronique. Al, Si, C, Fe et O étaient les principaux composants de ces phases amorphes. L'Al, le Si et le Fe étaient systématiquement associés au C, même à une résolution de taille inférieure à 1 nm (les semi-quantifications allaient de 11 à 41% de C, 4 à 7% de Fe, 34 à 36% d'Al et 22 à 46% de Si). Des images à haute résolution similaires ont été obtenues pour les associations organo-minérales d'andosol et des nanoCLICs synthétiques. À la résolution du TEM, l'analogue synthétique des nanoCLICs proposé par Tamrat et al. (2019) est cohérent avec les structures observées sur l'andosol. Sur la base de ces résultats, la majorité du C semble être sous forme de nanoCLICs dans ces fractions d'andosol et confirme l'hypothèse formulée par Basile Doelsch et al. (2015).

Financements et remerciements :

Ce travail est soutenu par l'ANR (projet NanoSoilC 589 ANR-16-CE01-0012-02), l'Université d'Aix-Marseille, le CIRAD et Le Région Sud. Nous remercions Thierry Woignier et Luc Rangan pour l'échantillonnage et la préparation des échantillons.

Références

Basile Doelsch et al., 2007. Mineral control of carbon pools in a volcanic soil horizon. *Geoderma*, 137 (3-4), 477-489. ISSN 0016-706.

Basile-Doelsch et al., 2015. Are Interactions between Organic Compounds and Nanoscale Weathering Minerals the Key Drivers of Carbon Storage in Soils? *Environ. Sci. Technol.* 49, 3997–3998.

- Kleber et al., 2007. A Conceptual Model of Organo-Mineral Interactions in Soils: Self-Assembly of Organic Molecular Fragments into Zonal Structures on Mineral Surfaces. *Biogeochemistry* 85, n° 1 (1 août 2007): 9-24.
- Levard et al., 2012. « Structure and distribution of allophanes, imogolite and proto-imogolite in volcanic soils ». *Geoderma* 183-184 (1 août 2012): 100-108.
- Tamrat et al., 2019. « Soil organo-mineral associations formed by co-precipitation of Fe, Si and Al in presence of organic ligands ». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10 juin 2019.

Des données ouvertes sur la décomposition des litières végétales dans les sols selon divers contextes agronomiques et pédoclimatiques

Jacqueton C.¹ (celine.jacqueton@inrae.fr), Akkal-Corfini N.², Alavoine G.¹, Bertrand I.³, Chabbert B.¹, Clivot H.¹, Duval J.⁴, Fanin N.⁵, Ferchaud F.⁴, Fontaine S.⁶, Giacomini S.⁷, Justes E.⁸, Morvan T.², Nicolardot B.⁹, Perveen N.⁶, Recous S.¹, Redin M.⁷, Refahi Y.¹, Sauvadet M.¹, Schmatz R.⁷, Thuries L.¹⁰, Vertes F.¹¹, Weintraub M.¹², Lashermes G.¹ (gwenaelle.lashermes@inrae.fr)

¹UMR FARE, INRAE, URCA, F-51100 Reims, France, celine.jacqueton@inrae.fr, gwenaelle.lashermes@inrae.fr

²UMR SAS, INRAE, Agrocampus Ouest, F-35042 Rennes, France

³UMR Eco&Sols, INRAE, IRD, Montpellier SupAgro, CIRAD, F-34060 Montpellier, France

⁴UMR BioEcoAgro, INRAE, Université de Liège, Université de Lille, Université de Picardie Jules Verne, F-02046 Barenton-Bugny, France

⁵UMR ISPA, INRA, Bordeaux Sciences Agro, F-33882 Villenave d'Ornon, France

⁶UREP, INRA, VetAgroSup, F-63100 Clermont-Ferrand, France

⁷Department of Soils, Federal University of Santa Maria, 97105-900 Santa Maria, RS, Brazil

⁸UMR System, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, CIHEAM IAM, F-34060 Montpellier, France

⁹UMR Agroécologie, INRA, CNRS, AgroSup Dijon, Université de Bourgogne, F-21065 Dijon, France

¹⁰UR Recyclage et risque, CIRAD, 97408 Saint Denis, France

¹¹UMR SAS, INRA, Agrocampus Ouest, 29000 Quimper, France

¹²Department of Environmental Sciences, University of Toledo, Toledo, OH 43606-3390, USA

Mots-Clés : biochimie, décomposition, données ouvertes, litière végétale, base de données

La décomposition des litières végétales dans les sols constitue un apport important de carbone (C) et d'azote (N) dans les agroécosystèmes. Ce processus biologique fournit des nutriments aux plantes, régule la vie biologique du sol et contribue à la stabilisation des matières organiques et du C dans les sols. La gestion de ce processus implique de pouvoir prédire la décomposition en fonction de la nature chimique des litières pour une grande diversité d'organes végétaux, d'espèces (Redin et al. 2014), de stades de maturité (Bertrand et al. 2009), dans de nombreuses situations agronomiques de recyclage (par exemple enfouies dans le sol, en surface, combinées à de la fertilisation) (Justes et al. 2009), de contextes pédoclimatiques, et en fonction des communautés microbiennes du sol (Fanin et al. 2016).

Des efforts considérables ont été fournis au cours des 30 dernières années pour étudier les processus de décomposition des litières végétales. La plupart des données ont été acquises au laboratoire. Ces données acquises au fil des projets dans des instituts de recherche publique sont éparpillées et risquent d'être perdues alors qu'elles constituent une base de connaissance irremplaçable qui peut être mobilisée pour répondre aux enjeux actuels de l'agro-écologie et de la bioéconomie.

Les objectifs de ce travail sont de méta-analyser le potentiel de minéralisation du C et la dynamique de l'azote, mais aussi du phosphore (P) dans certains cas, mesurés en conditions contrôlées en fonction (i) des propriétés du sol, (ii) du type de litière (culture principale, couvert intermédiaire, forêt, prairie) et de sa biochimie, (iii) de la biomasse microbienne et (iv) des situations de recyclage agronomique, par la construction et le partage d'une base de données en science ouverte.

Les données expérimentales et les métadonnées ont été collectées auprès d'un panel de groupes de recherche et regroupées en un seul jeu de données. Pour chaque expérimentation, ce jeu de données contient des métadonnées sur le projet, les collaborateurs impliqués et les publications associées. Des métadonnées sur le sol et les litières ont également été collectées afin de permettre leur caractérisation, de tracer leur lieu d'origine ainsi que les pratiques culturales mises en place avant leur prélèvement. D'autres métadonnées portent sur les conditions d'incubation et la méthode utilisée pour chaque mesure réalisée. La mesure de la minéralisation du C et/ou de la dynamique de l'azote a été réalisée pour chaque incubation. Certaines séries d'incubations comprennent également des litières ou des sols marqués avec des isotopes stables (^{13}C , ^{15}N) (Trinsoutrot et al. 2000), des mesures de la dynamique du P et des mesures quantitatives et qualitatives permettant la caractérisation des communautés microbiennes telles que les teneurs en acides gras phospholipidiques (PLFAs) ou encore en acide désoxyribonucléique (ADN).

Ces données et métadonnées ont été vérifiées afin de s'assurer de leur qualité et d'éviter toute valeur aberrante ou erreur de saisie. Elles ont ensuite été transférées dans des tableaux de données au format « .csv » permettant d'assurer leur pérennité et leur accessibilité *via* le logiciel RStudio (package tidyverse). Le vocabulaire des en-têtes de fichiers a été référencé par des thésaurus afin d'améliorer l'interopérabilité des données. Ces tableaux de données sont déposés sur l'entrepôt ouvert DataINRAE sous une licence ouverte permettant le partage et l'adaptation des données, y compris pour une utilisation commerciale afin de maximiser leur diffusion et réutilisation. Les données seront également regroupées dans une base de données ouverte (BASE-OR) permettant leur structuration et leur importation ciblée *via* des requêtes afin d'améliorer leur réutilisabilité.

Au total, 36 séries d'incubations ont été réunies, organisées et harmonisées dans un seul et même jeu de données. Cela représente 338 incubations, c'est-à-dire 338 combinaisons litière*sol*conditions d'incubations. 90% des données collectées ont fait l'objet d'études publiées et 74% sont publiées dans des journaux à comité de lecture. Environ 50% (161 incubations) des litières étudiées sont des litières de grandes cultures et 15% (49 incubations) sont des cultures intermédiaires. Le jeu de données comprend également des litières forestières, prairiales et des litières issues de culture pérennes (miscanthus, canne à sucre) (Figure 1). Au total, plus de 50 espèces de litières différentes ont été incubées dans plus de 30 sols différents, comprenant une large variation de texture, répartis sur 20 pays et 4 continents.

La minéralisation du carbone a été suivie dans le temps pour l'ensemble des 338 traitements. Pour 236 d'entre eux (69%), la dynamique de l'azote a également été suivie et les communautés de micro-organismes ont été étudiées pour 68 traitements (20%).

Au total, 69 concepts ont pu être reliés à des thésaurus, soit environ 55%. Les thésaurus utilisés ont été AGROVOC pour 72% des concepts mais aussi ANAEE (13%), Irstea thésaurus (7%), GEMET (6%) et Agronomy ontology (1%).

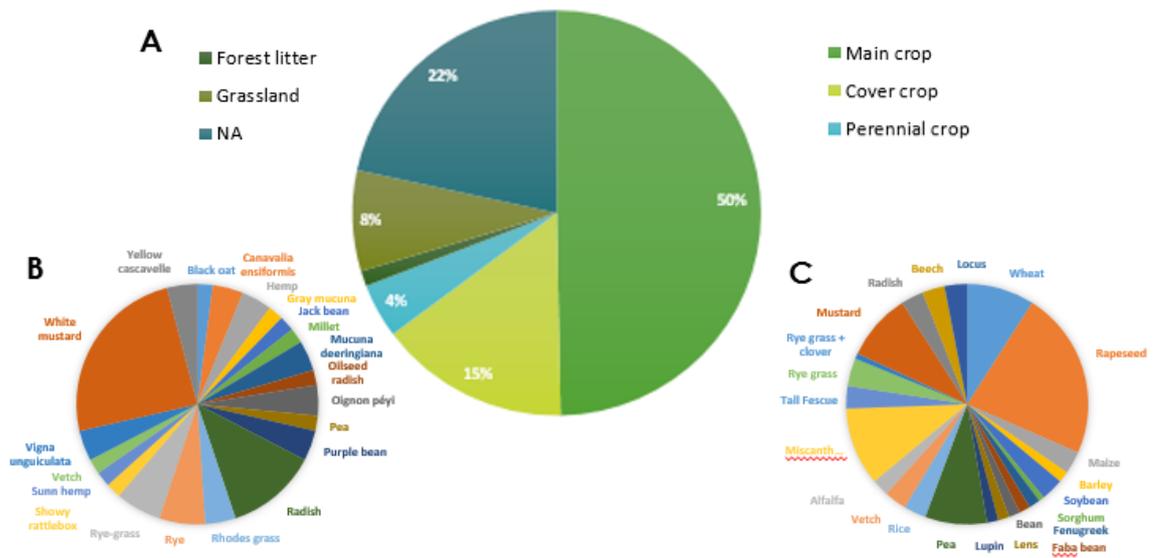


Figure 2. Origine de la litière (A) et diversité des espèces représentées dans le jeu de données selon leur origine : cultures intermédiaires (B) et cultures principales (C)

La capitalisation des efforts de recherche des laboratoires partenaires est rendue possible grâce à la valorisation des données et l'optimisation de leur réutilisation. En effet, ces données seront réutilisées pour la calibration d'outils numériques ou l'acquisition de références facilement mobilisables. Par exemple, ce jeu de données peut mettre en évidence le rôle de la biochimie de la litière sur la dynamique du C et du N ainsi que sur la composition et la diversité des communautés microbiennes.

L'approche mise en œuvre dans ce projet est étendue aux données acquises lors d'expérimentations au champ et aux produits résiduaux organiques (PROs).

Références :

- Bertrand I., Prevot M., Chabbert B., 2009. *Bioresource Technology* 100, 155-163.
- Fanin N., Fromin N., Bertrand I., 2016. *Ecology* 97(4), 1023-1037.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009. *Plant and Soil* 325, 171-185.
- Redin M., Guenon R., Recous S., Schmatz R., Freitas L., Aita C., Giacomini S., 2014. *Plant and Soil* 378, 205-214.
- Trinsoutrot I., Recous S., Mary B., Nicolardot B., 2000. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 1717-1730.

La chimie de la litière végétale contrôle la dynamique du carbone des sols à texture grossière

Raoul Huys¹, Vincent Poirier², Malo Y. Bourget¹, Catherine Roumet³, Stephan Hättenschwiler³, Nathalie Fromin³, Alison D. Munson⁴, Grégoire T. Freschet^{1,3}

¹ Station d'Écologie Théorique et Expérimentale, CNRS, Moulis, France.

² Station de Recherche Agroalimentaire, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Notre-Dame-du-Nord, Canada.

³ CEFE, Univ Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Univ Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France

⁴ Centre d'étude de la Forêt, Université Laval, Québec, Canada

Mots-Clés : Cycle du carbone, litière végétale, décomposition, matière organique du sol, effet d'amorçage

Étant donné que les sols stockent plus de carbone (C) que l'atmosphère et la biomasse terrestre réunies, l'équilibre entre l'absorption de C par le sol sous forme de matière organique du sol (MOS) et sa libération sous forme de CO₂ lors de sa décomposition est un facteur déterminant dans le cycle global du C qui régule le climat de notre planète. Le stockage à long terme du carbone organique du sol (COS) sous forme de matière organique associée aux minéraux (MOAM) est limité par la texture du sol, car l'occupation extensive des surfaces minérales pour la sorption de la matière organique (MO), qui est fournie principalement par les particules fines (argile + limon fin), conduit à une saturation en C du sol. Le C contenu dans la matière organique particulaire (MOP) a des temps de résidence plus courts, mais pour cette fraction, aucune limite claire de stockage de C n'a encore été identifiée ; son intégration dans les approches de stockage de C pour contribuer à l'atténuation du changement climatique semble donc appropriée (Barré *et al.*, 2017).

Bien que la litière végétale soit la source prédominante de C alimentant à la fois les processus d'absorption et de libération de C, la façon dont la chimie de la litière influence cet équilibre reste non résolue. Une conception récente de la formation et de la stabilisation de la MOS (« Microbial Efficiency-Matrix Stabilization » ; MEMS, Cotrufo *et al.*, 2013) soutient que les litières à forte teneur en composés labiles favorisent la formation de la MOS car ils sont plus efficacement convertis en biomasse microbienne et en produits métaboliques, qui sont considérés comme d'importants précurseurs de la MOS. Cependant, la formation et la stabilisation du C nouveau dans la MOS sont censées être modulées par la saturation en C du sol, ce qui pourrait inverser la relation entre la qualité de la litière et la formation et la stabilisation du carbone organique du sol (COS) (Castellano *et al.*, 2015). Comme environ 80 % des sols de la Terre contiennent moins de 30 % d'argile et sont donc susceptibles d'être saturés en C, il est urgent de comprendre le bilan du C dans les sols saturés en C en fonction de la qualité de la litière.

Nous avons donc suivi le devenir des litières de feuilles et de racines enrichies en ¹³C de 12 espèces de plantes herbacées jusqu'à la disparition presque complète des résidus de litière (un an en condition de décomposition très favorables) afin de tester l'effet global de l'apport et de la chimie de la litière sur la formation et la stabilisation de la MOS dans un sol sablo-limoneux proche de la saturation en C. Le nouveau COS s'est formé rapidement au début mais a diminué par la suite, et représentait entre 18% et 45% du C initial de la litière après un an. Le fractionnement du sol (à un an) a montré que le MOP-C dérivé de la litière représentait entre 0,001 et 0,11 g C g⁻¹ du C initial de la litière, et le MOAM-C dérivé de la litière entre 0,16 et 0,38 g C g⁻¹ du C initial de la litière. L'intégration du nouveau C dans la fraction MOAM malgré la saturation potentielle en C de notre sol suggère que (la plupart) du nouveau C a été adsorbé sur les molécules organiques des complexes organo-minéraux existants.

Les différences dans les MOAM-C et MOP-C dérivés de la litière étaient fortement corrélées positivement à la concentration en lignine de la litière, mais négativement aux concentrations en hémicellulose et aux lessivats d'azote. Les litières riches en lignine peuvent avoir favorisé la sélection de communautés de décomposeurs dominées par des champignons ayant des activités lignolytiques, favorisant ainsi la biomasse fongique et, par conséquent, la formation de MOAM-C. En outre, ou alternativement, la forte affinité sorptive des phénols dérivés de la lignine peut avoir favorisé leur stabilisation directe dans les MOAM. En comparaison, les produits de dégradation des composés plus labiles de la litière ont pu être soumis au recyclage microbien, augmentant ainsi la respiration du C de la litière, et réduisant le transfert du C de la litière vers le sol par rapport aux litières riches en lignine. L'observation que la fraction de la litière C respirée a révélé une dépendance inverse de la chimie de la litière que celle de la formation de MOAM-C et MOP-C soutient cette hypothèse. Quoi qu'il en soit, nos résultats suggèrent que la relation entre la qualité de la litière et l'efficacité de la formation de COS établie dans le cadre du MEMS est effectivement inversée lorsque la matrice minérale du sol est proche de la saturation en C. Dans ces conditions, l'effet des composés labiles sur la formation de COS peut n'être que transitoire (la nouvelle formation de COS a été stimulée par les composés hydrosolubles riches en nutriments au départ), ou largement surmonté par celui des litières récalcitrantes aux stades ultérieurs de décomposition.

Comme souvent observé, l'ajout de MO fraîche a également modifié la décomposition du COS natif (« effet d'amorçage » ou « effet de priming » ; Perveen et al., 2019). L'effet d'amorçage était fort et positif dans la phase d'incubation précoce, mais l'augmentation initiale de la minéralisation du C du sol a été entièrement contrebalancée par une diminution ultérieure de la minéralisation du C du sol natif. Cumulé sur un an, l'effet d'amorçage n'était pas significatif. Ces dynamiques soulignent l'importance d'examiner l'amorçage sur des périodes plus longues que ce qui est fait actuellement. Elles remettent également en question l'idée communément admise selon laquelle la surminéralisation de la MOS induite par la MO fraîche entraîne des pertes substantielles de COS, du moins pour les sols proches de la saturation en carbone.

En moyenne, l'apport de litière a induit un amorçage positif de la fraction MOAM (0,059 g C g⁻¹ de C du sol initial) mais un amorçage négatif de la fraction MOP (-0,062 g C g⁻¹ de C du sol initial), avec de grandes différences spécifiques aux espèces végétales dans les deux fractions. La perte de MOAM-C, bien que surprenante puisqu'elle est généralement considérée comme plus stable que la MOP-C, souligne son équilibre dynamique avec la solution du sol (Kleber et al., 2007), et indique que les composés plus jeunes et plus sorptifs peuvent déplacer la MO plus ancienne et précédemment adsorbée. Cette dynamique a probablement été renforcée par les perturbations induites expérimentalement dans les sols de nos microcosmes, et sa signification dans des conditions naturelles, relativement non perturbées, doit être testée. Les amorces des deux fractions étaient négativement corrélées entre elles, indiquant un comportement opposé des fractions MOAM et MOP, peut-être avec un transfert entre elles.

En moyenne sur l'ensemble du sol, aucun effet significatif de la chimie de la litière et de l'effet d'amorçage n'a été trouvé, même si ce dernier différait considérablement entre les litières. En revanche, les concentrations initiales de lignine et de lessivats d'azote dans la litière ont contrôlé l'amorçage de la MOP-C et de la MOAM-C (ce dernier effet n'étant significatif que pour les lessivats d'azote), mais de manière opposée. La diminution de l'amorçage positif de la MOAM-C avec l'augmentation des lessivats riches en N indique probablement une réduction de l'extraction microbienne de N, tandis que la diminution de l'amorçage négatif de la MOP-C peut impliquer une réduction du transfert du C du sol natif de la MOAM à la MOP. Il est important de noter que la corrélation négative entre l'amorçage MOP-C et MOAM-C indique que l'apport de litière peut affecter le COS natif bien plus que ce qui est actuellement mis en évidence par les évaluations du COS global, au moins dans les sols proches de la saturation en C.

Dans l'ensemble des gains et des pertes de C (amorcé), nos estimations de l'équilibre du COS dans la MOP et la MOAM ont révélé des tendances fortement contrastées parmi nos 24 litières, le gain

net de COS le plus important étant environ cinq fois plus grand que la perte la plus importante. Dans le cas de la MOAM, le gain de C résultant de la formation du COS a été en grande partie annulé par l'amorçage positif dans environ la moitié des litières. Cependant, comme la reconstitution du C de la MOP était généralement plus importante que la perte de C induite par l'amorçage, l'effet net de la litière en décomposition sur le COS total du sol est resté principalement positif. Ces résultats confirment les hypothèses précédentes selon lesquelles tout gain de C du sol se produit sous forme de MOP une fois que la fraction MOAM est saturée en matière organique. En moyenne, nos apports de litière ont augmenté le stock total de C du sol de 4 % et 8 % (par rapport à sa teneur initiale en C) pour les litières de feuilles et de racines, respectivement ; ces deux augmentations étaient significativement supérieures à zéro et différaient significativement l'une de l'autre. Comme prévu à partir des effets de la chimie de la litière sur la formation et l'amorçage du COS, cet effet différentiel des litières de feuilles et de racines a été associé à la concentration plus élevée en lignines et à la concentration plus faible en N des lixivats des litières de racines par rapport aux litières de feuilles. Ce résultat d'un effet principalement positif mais variable des litières végétales sur l'équilibre entre la formation et la déstabilisation du COS est essentiel pour notre compréhension des effets des plantes sur le cycle global du C et doit être étendu aux effets des plantes vivantes, y compris les processus d'exsudation des racines.

Ces résultats originaux remettent en question les concepts classiques de la formation, de la stabilisation et de la déstabilisation du COS, et contrastent avec les résultats fréquemment rapportés pour les sols à texture fine. Pour expliquer ces anomalies, nous proposons une perspective intégrative dans laquelle la qualité de la litière et la texture du sol contrôlent de manière interactive les flux de C du sol en modulant le fonctionnement de plusieurs mécanismes de stabilisation et de déstabilisation du COS. Des contraintes de temps et d'espace nous empêchent actuellement de présenter cette perspective, mais nous sommes confiants que vous pourrez bientôt la trouver dans la littérature évaluée par les pairs. Quoi qu'il en soit, nos résultats impliquent que les stratégies de gestion des sols visant à améliorer le stockage du C afin de contribuer à l'atténuation du changement climatique et de promouvoir le fonctionnement durable des écosystèmes doivent tenir compte explicitement des différences entre les types de sols et devraient se concentrer plus spécifiquement sur le stockage du C à moyen terme (Barré et al., 2017) ainsi que sur son interaction avec les processus de stabilisation et de déstabilisation à long terme.

References

- Barré, P., *et al.* (2017). Ideas and perspectives: Can we use the soil carbon saturation deficit to quantitatively assess the soil carbon storage potential, or should we explore other strategies? *Biogeosciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-395>
- Castellano, M. J., Mueller, K. E., Oik, D. C., Sawyer, J. E., & Six, J. (2015). Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. *Global Change Biology*, *21*, 3200–3209.
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., & Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, *19*, 988–995.
- Kleber, M., Sollins, P., & Sutton, R. (2007). A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry*, *85*, 9–24.
- Perveen, N., *et al.* (2019). Universality of priming effect: An analysis using thirty five soils with contrasted properties sampled from five continents. *Soil Biology and Biochemistry*, *134*, 162-171.

La restitution des résidus d'hévéas après abattage de la précédente plantation améliore la restauration de la faune du sol

Kouakou K. Aymard^{1,2}, Yéo Kolo¹, Thibaut Perron³, Frédéric Gay³, Alain Brauman²

¹University NANGUI ABROGOUA, Abidjan, Côte d'Ivoire

²IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier, France

³CIRAD, UMR Eco&Sols, Montpellier, France

Mots-Clés : résidus d'hévéa, légumineuses, perturbation, restauration, biodiversité du sol

Le changement d'usage des terres est à l'origine de modifications des écosystèmes, provoquant la perte de nombreuses espèces et entraînant leur substitution par d'autres espèces ayant des traits différents. Dans les plantations d'hévéas, le maintien et la restauration de la biodiversité après des rotations successives est indispensable pour assurer la durabilité fonctionnelle des sols. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet d'apport de matières organiques sur la restauration de la diversité faunique du sol. Pour cela, un dispositif expérimental impliquant différents niveaux de matières organiques sous forme de résidus d'hévéas issus de la plantation précédente (*Hevea brasiliensis*) et de légumineuses (*Pueraria Phaseoloides*) a été mise en place dans 2 plantations industrielles d'hévéas (SAPH et SOGB) en Côte d'Ivoire. Les micro-organismes du sol ont été évalués par la mesure des profils moléculaires via un séquençage haut débit de l'ADN16S (bactéries) et de l'ADN18S (champignons) et des profils métaboliques via la technique de MicrorespTM. Les nématodes du sol ont été caractérisés par la méthode modifiée de Seinhorst. Les mesures de diversité de la macrofaune ont été effectuées par la méthode TSBF. Six mois après l'abattage de la précédente plantation, une baisse de la densité (87% à la SOGB et 30% à la SAPH) et de la diversité (14% à la SOGB et 40% à la SAPH) de la macrofaune du sol a été observée. Vingt-quatre mois après l'abattage, la densité et la diversité des bactéries, des nématodes et de la macrofaune du sol ont montré une restauration plus rapide dans les pratiques avec résidus d'hévéas et légumineuses par rapport au contrôle. A la SOGB par exemple, la densité de la macrofaune du sol a été restaurée de 200 à 300 % dans les pratiques avec résidus d'hévéas et de 8 à 100 % dans les pratiques sans résidus et avec légumineuses. Tandis que la diversité a été restaurée de 130 à 150% dans les pratiques avec résidus contre 75 à 97 % dans les pratiques sans apports. A la SAPH, une restauration de de 300% de la densité de la macrofaune a été observée dans les pratiques avec résidus contre 70% dans les pratiques sans résidus. La diversité a été restaurée de 58 à 74 % dans les pratiques avec résidus d'hévéa contre 35 à 39% dans les pratiques avec légumineuses et sans résidus. Le taux de renouvellement dans la composition taxonomique des bactéries, des nématodes et de la macrofaune était influencé aussi bien par les dates d'échantillonnage que les pratiques au sein de chaque site. Ces résultats montrent que la restauration de la biodiversité du sol aux pratiques n'est pas générique et dépend des sites (climat et texture du sol). Cette étude montre que l'apport de matières organiques constitue le levier principal de la restauration de la biodiversité du sol dans les plantations d'hévéas lors de la phase immature.

Devenir du carbone de produits résiduaux organiques dans deux profils de sols tropicaux (0-100 cm) par approche isotopique du carbone 13.

Baptiste Hulin¹, Floriane Jamoteau¹, Christine Hatté², Emmanuel Tillard³, Isabelle Basile-Doelsch¹, Jérôme Balesdent¹, Antoine Versini⁴

¹Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, 13545 Aix-en-Provence, France

²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 8212 CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France.

³CIRAD, Unité mixte de recherche (UMR) systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, 97410 Saint Pierre, Réunion, France

⁴CIRAD, Unité de recherche internationale (UPR) recyclage et risques, Station de La Bretagne, 97743 Saint-Denis, Réunion, France

Mots-Clés : stockage de carbone, matières organiques des sols, amendements organiques, arénosol, andosol, carbone 13,

Le secteur agricole est responsable d'une part importante des émissions anthropiques de gaz à effets de serre (N₂O, CH₄, CO₂). Cependant, certaines pratiques agricoles permettent de stocker du carbone dans les sols agricoles, et deviennent ainsi un levier pour atténuer le changement climatique. Ainsi, l'apport de produits résiduaux organiques (PRO) représente un apport de carbone (C) potentiellement important dans les sols. Cependant la quantification du carbone dérivé des PROs (PRO-C) dans des essais au champs reste un défi lié d'une part à la diversité de sources de C présents (végétation, C de la matière organique du sol avant apports, PRO) et d'autre part aux incertitudes des mesures de concentration et de densité apparente pour le calcul des stocks.

Les travaux de Jamoteau et al. (en révision ; JES 2021) montrent que, dans les horizons de surface de deux sols tropicaux, les approches par bilan de masse isotopique du carbone 13 permettent de quantifier les apports de carbone issus des PROs. Bien que plus complexes à mettre en œuvre, la quantification est plus rigoureuse que par les méthodes classiques basées sur les différences de stock. Ces approches isotopiques ne peuvent cependant être mises en œuvre que si la différence isotopique entre le sol et le PRO est au moins de 3‰.

Dans ce travail, nous testons la pertinence de la quantification du devenir du C issu de PROs au-delà de l'horizon de surface, dans les horizons profonds par des approches isotopiques identiques. Nous avons travaillé sur les deux profils de sols tropicaux étudiés par Jamoteau et al. (en révision ; JES 2021). L'arénosol et l'andosol (île de la Réunion), en prairie, ont été amendés en continu (répétition sur 3 blocs) avec du compost, du lisier ou une fertilisation minérale (sans C) pendant 14 ans. Au bout de 14 ans d'apports, nous avons re-échantillonné les sols pour ce travail jusqu'à 1m de profondeur (4 horizons distincts : 0-10 ; 10-20 ; 20-50 et 50-100 cm) et analysé le C total et le $\delta^{13}\text{C}$. Nous avons également réalisé une analyse minéralogique par DRX.

Pour l'arénosol, les premiers résultats montrent que les concentrations en carbone dans les parcelles amendées sont supérieures au témoin dans les 2 horizons supérieurs (en moyenne sur le 0-10 cm : +28 ±13.9 gC.kg pour le compost et +8.6 ±2.3gC.kg pour le lisier). Le bilan de masse isotopique montre que dans le premier horizon, plus de 50% du C total est dérivé du PRO dans le sol amendé en compost contre 25% pour le sol amendé en lisier. Dans les horizons sous-jacents 10-20 cm, 20-50 et 50-100 cm, les différences de concentration en carbone entre sol amendé et sol

témoin sont beaucoup plus faibles qu'en surface. Elles ne sont plus significativement différentes à partir de l'horizon 20-50 cm. En revanche, malgré les incertitudes, l'empreinte de la signature isotopique des PROs est observée jusque dans l'horizon le plus profond. Ces premiers résultats sur l'arénoisol tendent à montrer que le C issu des PROs est transféré sur l'ensemble du profil dans le contexte étudié. La composition minéralogique reste la même pour les 4 horizons et les 3 régimes de fertilisation. La comparaison des résultats de l'arénoisol avec ceux de l'andosol mettra en lumière le rôle de la minéralogie dans le transfert des PROs à l'échelle des profils de sol étudiés.

Remerciements et hommage

Ce travail est soutenu par l'ANR (projet NanoSoilC 589 ANR-16-CE01-0012-02), l'Université d'Aix-Marseille, le CIRAD et la région Sud.

Jérôme Balesdent nous a quitté en juillet 2019. Ce projet est une déclinaison des approches C3/C4 chères à Jérôme. Il a été un fer de lance de ce travail, tant dans sa mise en œuvre théorique, analytique que statistique. Nous aurions tant aimé mener ces travaux avec lui jusqu'au bout. Par cette communication, nous espérons lui rendre un hommage qui, nous l'espérons, satisferait sa rigueur scientifique.

Références

Jamoteau, F., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Tillard, E., Versini, A., en révision. Quantification of soil C inputs from organic fertilizers in tropical long-term field experiments: potential of stable carbon isotopes. *Isot. Environ. Health Stud.* En révision

Stocks de carbone dans les sols et les biomasses des principaux modes d'occupation du plateau d'Allada (Sud du Bénin)

I.A. Houssoukpèvi^{1,2}, H.N.S. Aholoukpè^{2,3}, D.J.M. Fassinou², N. Rakontondrazafy¹, L. Chapuis-Lardy^{1,4}, G.L. Amadji², T. Chevallier¹

¹ UMR Eco&Sols, Université de Montpellier, CIRAD, INRA, IRD, Montpellier SupAgro, 34060 Montpellier

² UR Ecopédologie; Laboratoire de Sciences du sol; Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, BP 526 Cotonou, Benin

³ Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP), Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, BP 01 Pobè, Benin

⁴ LMI IESOL, Centre de recherche ISRA-IRD, BP 1386 Dakar, Sénégal

Mots-Clés : Forêt – Culture – Plantations - Palmiers à huile - Cartographie.

L'évaluation des stocks de carbone (C) selon les modes d'occupation des sols est essentielle pour étayer les politiques climatiques. Néanmoins la compréhension de la distribution de ces stocks dans les différents compartiments de C des écosystèmes des pays de l'Afrique sub-saharienne, comme le Bénin, reste incomplète. Cette quantification est un défi du fait de la forte variabilité spatiale des climats, des sols mais surtout des modes d'occupation des sols et des pratiques de gestion. Cette variabilité est visible dans les paysages, d'autant plus dans les régions rurales proches des grandes villes densément peuplées. Ces régions sont généralement une mosaïque de modes d'occupation des sols avec des stocks de carbone probablement très hétérogènes. Il est d'autant plus nécessaire d'avoir des valeurs de références de carbone dans ces régions dynamiques où les modes d'occupation des sols sont en pleine évolution. La pression d'urbanisation et de mise en culture conduisent souvent à une modification des occupations des sols et des baisses des stocks de C que l'on a du mal à évaluer. Au Bénin, le plateau d'Allada proche de la capitale économique du pays est un bel exemple de ce type de paysage en évolution.

Dans cinq modes représentatifs de l'occupation des sols du plateau d'Allada, au sud-est du Bénin, nous avons quantifié les 4 compartiments de C suivants : biomasse (aérienne et racinaire), nécromasse, litières et sol (0-30 et 30-100 cm). Seuls les Ferralsols, très majoritaires sur le plateau d'Allada, ont été échantillonnés. Leur texture est relativement homogène sur le plateau avec une teneur en sable moyenne de 748 à 838 g.kg⁻¹ (0-30 cm). Des mesures de terrain ont été effectuées dans 5 parcelles représentatives de chacun des modes d'occupation du plateau d'Allada : les forêts, les plantations (Teck ou Gmelina), les palmeraies adultes, les palmeraies jeunes associant des cultures, les cultures. Les cinq (5) parcelles ont été choisies pour représenter les différentes pratiques de gestion sous chaque mode d'occupation. Ainsi, forêt étatique et forêts privées sacrées, plantations d'état et plantations villageoises, cultures de tomates, manioc, ananas, maïs, palmeraies adultes et jeunes ont été échantillonnées. En plus des mesures de biomasses et de teneur en C des sols, la structure des peuplements des forêts et des plantations a été estimée (densité, diamètres des troncs, surface terrière, indice de diversité).

Les forêts présentent des stocks totaux de carbone – tous compartiments considérés – de 389 Mg C.ha⁻¹. Ces stocks sont plus importants que pour les autres modes d'occupation des sols : 222, 154, 105, 75 Mg C.ha⁻¹, respectivement dans les plantations, les palmeraies adultes, les palmeraies jeunes et les cultures. Les stocks totaux de carbone sont plus répartis dans la biomasse aérienne et souterraine plutôt que dans les sols (0-100 cm) ; par exemple pour les forêts : 278 Mg C.ha⁻¹ vs 82 Mg C.ha⁻¹ (Figure).

Les sols des forêts stockent plus de carbone (43 Mg C.ha⁻¹) sur la profondeur 0-30 cm du sol comparativement aux autres modes d'occupation des sols (31, 30, 23, 22 Mg C.ha⁻¹ respectivement

dans les plantations, les cultures, les palmeraies jeunes et adultes). Par contre, sur la profondeur 30-100 cm, le stock de C du sol apparaît plus élevé pour les cultures (43 Mg C.ha⁻¹) et les palmeraies adultes (42 Mg C.ha⁻¹) par rapport aux autres modes d'occupation (32 à 40 Mg C.ha⁻¹), du fait de valeurs de teneur en argile et de densité apparente du sol plus élevées en profondeur.

La biomasse (i.e. aérienne et racinaire), la nécromasse et la litière varient significativement en fonction du mode d'occupation des sols. Les forêts possèdent les plus fortes valeurs de biomasse et de nécromasse. Les forêts stockent 2 fois plus de carbone dans la biomasse que les plantations (+ 139 Mg C.ha⁻¹) et 3 fois plus que les palmeraies adultes (figure). La litière est un élément important dans l'évaluation du carbone des palmeraies adultes (11 Mg C.ha⁻¹).

Les stocks de C sont plus variables dans la biomasse et la nécromasse des forêts et plantations que dans les compartiments litière et sol. La structure des peuplements des forêts et des plantations peut expliquer en partie les fortes variabilités des biomasses mesurées. Nos résultats montrent l'importance du type de boisement, ou du reboisement pour conserver les stocks de carbone dans les paysages voire pour augmenter ces stocks. Ceci passe par la préservation des forêts et les ressources forestières, l'encouragement du boisement avec une diversité d'espèces d'arbre, l'accompagnement des communautés locales dans la gestion et la sécurisation des forêts sacrées. En agriculture, bien que les sols stockent peu de carbone, la promotion de pratiques de gestion des résidus organiques doit également être promue pour soutenir la fertilité et la production agricole des Ferralsols du plateau d'Allada.

Enfin, nos résultats pourront être utiles pour (1) cartographier la distribution spatiale des stocks de C du plateau d'Allada, (2) suivre l'évolution des stocks de C de la région avec l'évolution des modes d'occupation des sols et (3) soutenir la mise en œuvre d'une politique « carbone » d'aménagement du plateau d'Allada.

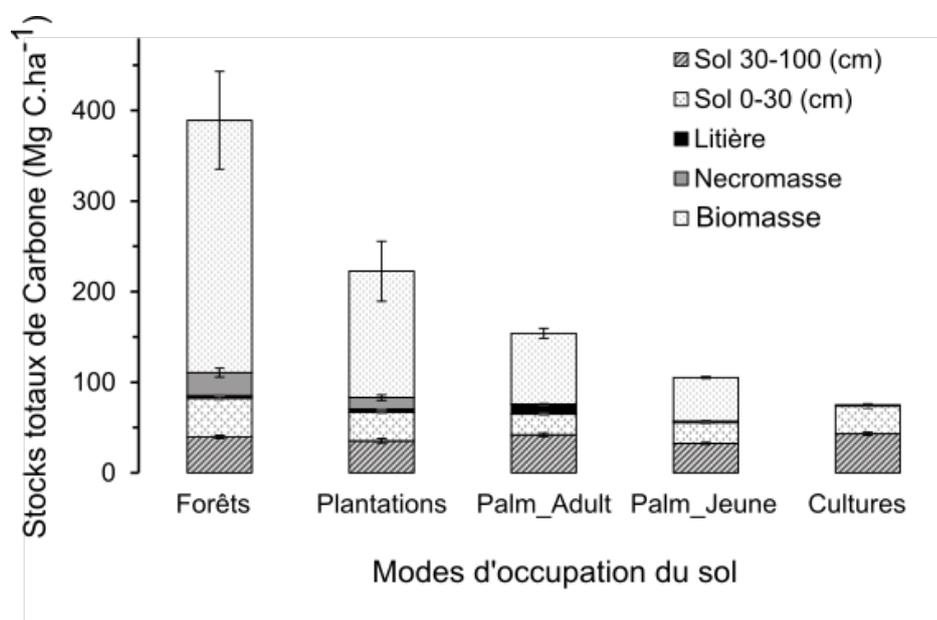


Figure : Stocks totaux de carbone dans différents compartiments de l'écosystème (sol, litière, nécromasse ligneuse, biomasse aérienne et racinaire) selon différents modes d'occupation des Ferralsols du plateau d'Allada (Bénin)

Etude des interactions biochar-compost sur les services écosystémiques des sols

Marie-Liesse Aubertin^{1,2}, Vincent Miconnet¹, Jean-Pierre Petraud¹, Cyril Girardin¹, Sabine Houot¹, Cornelia Rumpel²

¹National Institute for Agricultural Research, Ecosys Soil, UMR INRA-AgroParisTECH, 78820 Thiverval-Grignon, France.

²CNRS, Sorbonne Université, Institute of Ecology and Environmental Sciences, IEES UMR 7618, CNRS-UPMC-UPEC-INRA-IRD, 75005 Paris, France.

Mots-Clés : Biochar, Compost, Carbone, Isotopie

L'amendement au sol de biochar, matière organique pyrolysée, permet d'améliorer la rétention en eau, la formation d'agrégats ainsi que le stockage de carbone dans le sol. Son amendement combiné à du compost constitue un apport de nutriments plus facilement disponible pour les plantes. L'objectif de notre étude est d'étudier les interactions entre biochar et compost sur différents services écosystémiques après 14 mois sur le terrain en milieu tempéré.

Pour cela, nous avons utilisé des biochars de miscanthus et de refus de compostage, obtenus après pyrolyse à 550°C pendant 10 minutes, et un compost issu de déchets verts. Les biochars et le compost ont été ajoutés seuls ou combinés à un ratio 20-80 % de biochar-compost. Le biochar et le compost ont été amendé au sol (luvisol), dans des litterbags, à hauteur de 3 et 6 %, respectivement. Les litterbags ont ensuite été mis au champ en milieu tempéré (Beauvais), à une profondeur de 5 cm pendant 14 mois. Dans les litterbags initiaux et ceux étant resté 14 mois sur le terrain, nous avons analysé la rétention en eau, les teneurs en nutriments, l'activité microbienne et enzymatique et les teneurs en carbone dans les fractions granulométriques des litterbags aux tamis 2 mm, 200 µm et 50 µm.

Les résultats de la rétention en eau ont montré que après 14 mois, le biochar et le compost semblaient interagir pour une meilleure rétention en eau dans les conditions sèches, proches du point de flétrissement (figure 1). En revanche, l'amendement au sol de biochar et/ou de compost ne semble pas avoir eu d'effet sur la teneur en nutriments, les activités microbiennes et enzymatiques, et la formation d'agrégats après 14 mois sur le terrain en milieu tempéré. Nous prévoyons un transfert de carbone issu du biochar dans les fractions plus petites, après 14 mois sur le terrain.

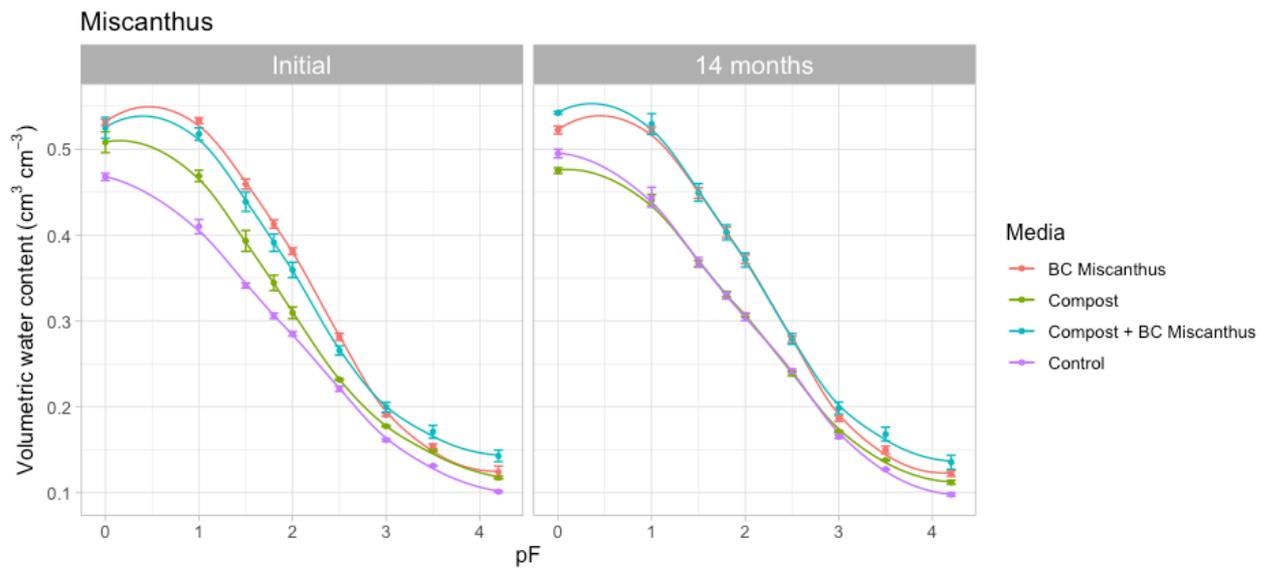


Figure 1 : Courbes de rétention en eau des litterbags initiaux et après 14 mois sur le terrain.

Etude des interactions biochar-compost sur le stockage de carbone dans le sol après 14 mois en milieu tempéré

Vincent Miconnet¹, Marie-Liesse Aubertin^{1,2}, Jean-Pierre Petraud¹, Cyril Girardin¹, Sabine Houot¹, Cornelia Rumpel²

¹National Institute for Agricultural Research, Ecosys Soil, UMR INRA-AgroParisTECH, 78820 Thiverval-Grignon, France.

²CNRS, Sorbonne Université, Institute of Ecology and Environmental Sciences, IEES UMR 7618, CNRS-UPMC-UPEC-INRA-IRD, 75005 Paris, France.

Mots-Clés : Biochar, Compost, Carbone, Isotopie, fractionnement

Le biochar est une matière organique pyrolysée, riche en carbone stable. Son amendement au sol permet d'augmenter durablement le stockage du carbone. La combinaison du biochar avec le compost permet des interactions physiques, pouvant limiter la dégradation des particules de compost incluses et/ou adsorbées dans les pores du biochar. Des interactions biochar-compost peuvent également amener à la formation d'agrégats.

L'objectif de notre étude est de localiser et de quantifier le carbone stocké dans les agrégats de sol, suite aux interactions entre biochar et compost après 14 mois sur le terrain en milieu tempéré. Pour cela, nous avons utilisé un biochar de *Miscanthus* obtenu après pyrolyse à 550°C pendant 10 minutes et un compost de déchets verts. Le biochar et le compost ont été amendés seuls à du sol, à hauteur de 3 et 6 % respectivement, ou combinés, avec un ratio de mélange biochar-compost de 20-80 %. Les prélèvements initiaux et après 14 mois sur le terrain ont été fractionnés granulométriquement à 2 mm, 200 µm et 50 µm, puis les fractions minérales et organiques des fractions > 50µm ont été séparées par densimétrie.

Nous avons analysé les teneurs en carbone et les signatures isotopiques du carbone de l'ensemble des fractions. Grâce aux signatures isotopiques significativement différentes du biochar et du compost, nous avons pu estimer l'origine du carbone (biochar ou compost) dans les fractions organiques.

Les résultats montrent que après 14 mois sur le terrain, la masse des fractions organiques particulaires issues des amendements de mélanges et de biochar de 2 mm – 200 µm ont augmenté alors que la masse des particules organiques > 2 mm ont diminué (figure 1). Cela traduit un transfert des particules organiques > 2 mm à des fractions plus fines après 14 mois sur le terrain. Nous prévoyons que les résultats des signatures isotopiques du carbone des fractions organiques montrent un transfert privilégié des particules de biochar par rapport au compost, du fait de sa plus grande friabilité. Nous prévoyons également que le biochar et le compost interagissent sur la rétention des particules organiques dans les fractions > 200 µm.

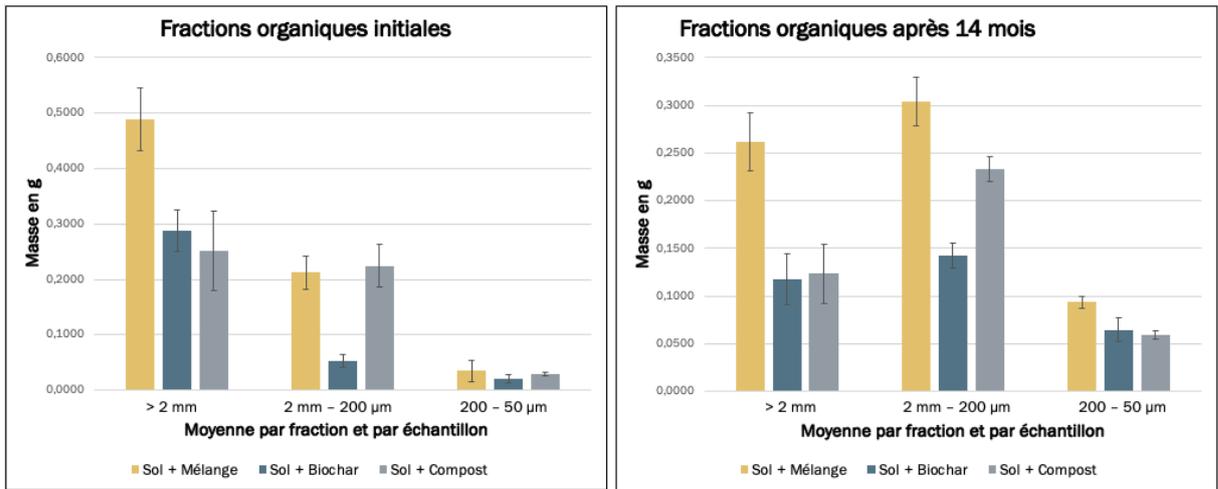


Figure 1 : Bilan de masse des fractions de particules organiques de biochar, compost ou de leur mélange, pour les échantillons initiaux et après 14 mois sur le terrain.

Phytostabilisation des sols contaminés en éléments traces métalliques à Lubumbashi : effet des amendements organiques et du calcaire sur la performance des six espèces ligneuses.

Serge Langunu^{1,2}, Mylor Ngoy Shutcha¹ & Gilles Colinet²

¹Ecologie, Restauration Ecologique et Paysage (EREP), Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, BP 1825 Lubumbashi, RD Congo (Serge.Langunu@uliege.be; mylor.ngoyshutcha@unilu.ac.cd)

²Echanges Sol-Eaux-Plantes, Faculté de Gembloux Agro Bio Tech, Université de Liège (gilles.colinet@uliege.be)

Mots-Clés : amendements, éléments traces métalliques, plantes ligneuses, phytostabilisation, Lubumbashi

Dans la ville de Lubumbashi (Sud-Est de la RDC), un cône de contamination des sols en métaux traces suite aux émissions atmosphériques de l'usine de la Gécamines a fait l'objet de diverses études.

Il a été observé dans cette partie de la ville des concentrations totales en Cu de l'ordre de 500 à 50.000 mg/kg⁻¹, ainsi que d'autres ETMs comme l'As, Pb, le Zn ou le Co. Les sols dépourvus de végétation sont sujets à l'érosion hydrique pendant la saison des pluies et à l'érosion éolienne durant la saison sèche. Ces deux types d'érosion génèrent un risque continu d'exposition aux métaux pour les personnes et les écosystèmes.

Des résultats intéressants sont obtenus et documentés avec des espèces herbacées tolérantes aux fortes concentrations en ETMs avec utilisation d'amendements organiques et calcaires. Dans ce contexte, un essai de phytostabilisation assisté par des amendements organiques et du calcaire a été mis en place avec six espèces ligneuses au mois de novembre 2019.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les effets des amendements organiques et calcaires *in situ* sur la performance d'*Acacia auriculiformis*, *Delonix regia*, *Syzygium guineense*, *Leucaena leucocephala*, *Mangifera indica* et *Albizia lebbek* sur les sols pollués de la ville de Lubumbashi. Les résultats après neuf mois d'observation montrent que la croissance végétative (nombre de feuilles, hauteur et diamètre au collet) et la survie étaient meilleures pour les individus installés sur des sols amendés comparativement aux sols non amendés (Photo 1). A terme, des espèces herbacées tolérantes devraient s'installer entre les lignes des ligneuses. Ce résultat s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des techniques de phytoremédiation et des services écosystémiques en milieux urbains pollués.



Photo1. Evolution de la croissance des espèces installées sur sol contaminés 9 mois après plantation (à gauche *Mangifera indica* sur sol non amendé et au milieu *Delonix regia* et à droite *Leucaena leucocephala* sur sol amendé).

Dynamique de formation de la détritosphère à nano-échelle par NanoSIMS : cas de pailles de maïs incubées dans un gleysol

Werbson Lima Barroso ^{1,2,3*}, Vincent Poirier ⁴, Carmen Hoeschen ^{5,6}, Steffen A. Sheweizer ⁶, Gertraud Harrington ⁶, Joann K. Whalen ⁷, Denis A. Angers ⁸, Isabelle Basile-Doelsch ^{1*}

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

² Département de Science du Sol, Laboratoire de Matière Organique du Sol, Université de São Paulo, Av. Pádua Dias, 235 - Agronomia, Piracicaba - SP, 13418-900, Brasil

³ Ecole Polytechnique UniLaSalle, Terre et Sciences, Beauvais, 19 rue Pierre Waguet, France

⁴ Unité de Recherche et Développement en Agriculture et Agroalimentaire de l'Abitibi-Témiscamingue, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 79 rue Côté, Notre-Dame-du-Nord, Québec, J0Z 3B0, Canada ; vincent.poirier@uqat.ca

⁵ Department of Soil System Sciences, Helmholtz-Centre for Environmental Research - UFZ, Halle (Saale), Germany, Institute for Advanced Study, Technical University of Munich, Garching, Germany; carmen.hoeschen@wzw.tum.de

⁶ Chair of Soil Science, TUM School of Life Sciences Weihenstephan, Technical University of Munich, Freising-Weihenstephan, Germany; schweizer@wzw.tum.de (S.A.S.); harrington@wzw.tum.de

⁷ Joann K. Whalen, Université McGill, Département des sciences des ressources naturelles, Immeuble Macdonald-Stewart, 21111 rue Lakeshore, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec, H9X 3V9, Canada ; joann.whelen@mcgill.ca

⁸ Denis A. Angers, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, Québec, G1V 2J3, Canada ; denis.angers@canada.ca

* basile@cerege.fr (I.B-D.); werbson.limabarroso@etu.unilasalle.fr (W.L.B.)

Mots-Clés : Matière organique des sols ; détritosphère ; incubation ; NanoSIMS ; horizon de surface et horizon profond

Les micro-organismes du sol jouent un rôle clé dans la dynamique des matières organiques du sol (MOS) ([Basile-Doelsch et al., 2020](#)). Pendant le processus de décomposition (dépolymérisation oxydative), ils transforment la matière organique particulaire (POM) en molécules plus simples. Ces molécules peuvent ensuite (1) soit interagir directement avec les phases minérales du sol (stabilisation par interaction organo-minérales) soit (2) être absorbées par les micro-organismes pour synthétiser leur biomasse ou leurs métabolites extracellulaires et à terme (mort des organismes) rejoindre le pool organo-minéral. Par des méthodes indirectes à l'échelle millimétrique, il est estimé que le volume de sol impliqué dans la décomposition autour des POM, appelé détritosphère, a une épaisseur d'environ 2 mm ([Védère et al., 2020](#)). D'autre part, la NanoSIMS (Nanoscale Secondary Ion Mass Spectrometry), permet, avec une résolution en masse suffisante pour cartographier différents isotopes, de cartographier la localisation des atomes avec une résolution spatiale d'environ 100 nm. Cette technique est prometteuse pour suivre le transfert de ¹³C et de ¹⁵N de la POM vers le pool de MOS organo-minéral ([Hoppe et al., 2013](#) ; [Vogel et al., 2014](#)).

L'objectif de cette étude est d'utiliser la NanoSIMS pour caractériser la détritosphère dans des sols avec différentes teneur en MO native. Il s'agit d'étudier la détritosphère in situ et à une échelle fine (quelques centaines de microns à distance des POM pour (1) préciser les volumes de sol concernés par la détritosphère et (2) mieux comprendre les processus de transfert du C de la POM vers la MO

stabilisée par interactions organo-minérales. Il s'agit également (3) de déterminer si la teneur en MO native du sol peut affecter le développement de la détritusphère et, par conséquent, la stabilisation des produits microbiens (métaboliques et nécromasses).

Les échantillons d'un sol canadien de type Gleysol Haplic ont été collectés à deux profondeurs différentes : 0 - 20 cm et 30 - 70 cm. Ces sols ont reçu 10 g de C-résidu kg⁻¹ de sol (pailles de maïs marqué ¹³C et ¹⁵N). Les sols avec et sans paille (contrôle) ont été incubés pendant 51 jours dans une expérimentation antérieure (Poirier et al., 2013). Les macroagrégats (1 à 2 mm) et les pailles ont ensuite été imprégnés en résine et polis. Les images (30 microns x 30 microns) sont acquises par NanoSIMS (masses ¹⁶O, ¹²C, ¹³C, ¹⁴N, ¹⁵N, ²⁸Si, ²⁷Al).

Les premiers résultats montrent que, dans notre système, seul le marquage ¹⁵N est significatif pour suivre le transfert des éléments à partir de la POM marquée. Après 51 jours, les zones organo-minérales au contact des POM marquées ne sont pas affectées de manière uniforme par la présence de ¹⁵N. Au contraire, en 2D, le ¹⁵N est observé principalement sur des zones ponctuelles, distantes les unes des autres, plutôt circulaires et d'un diamètre assez homogène de quelques microns. Bien que le nombre d'image limité ne permette pas d'approches statistiques rigoureuses, la fréquence d'observation de ces zones circulaires semble diminuer à mesure que l'on s'éloigne d'une POM. Ces zones ont été observées jusqu'à une distance de 150 microns des POM. Nous tenterons d'interpréter ces observations inédites au regard des mécanismes d'agrégation et de décomposition des POM déjà décrits dans la littérature.

Références

- Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., et Pellerin, S., 2020. Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. Biogeosciences [en ligne], volume 17, n° 21. p. 5223-5242. Date de consultation : 19/04/2021. <<https://bg.copernicus.org/articles/17/5223/2020/>>.
- Hoppe, P., Cohen, S., et Meibom, A., 2013. NanoSIMS: Technical Aspects and Applications in Cosmochemistry and Biological Geochemistry. Geostandards and Geoanalytical Research [en ligne], volume 37, n° 2. p. 111-154. Date de consultation : 15/04/2021. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1751-908X.2013.00239.x>>.
- Poirier, V., Angers, D.A., Rochette, P., et Whalen, J.K., 2013. Initial soil organic carbon concentration influences the short-term retention of crop-residue carbon in the fine fraction of a heavy clay soil. Biology and Fertility of Soils [en ligne], volume 49, n° 5. p. 527-535. Date de consultation : 23/04/2021. <<https://doi.org/10.1007/s00374-013-0794-6>>.
- Védère, C., Vieublé Gonod, L., Pouteau, V., Girardin, C., et Chenu, C., 2020. Spatial and temporal evolution of detritusphere hotspots at different soil moistures. Soil Biology and Biochemistry [en ligne], volume 150, p. 107975. Date de consultation : 21/04/2021. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071720302716>>.
- Vogel, C., Mueller, C.W., Höschen, C., Buegger, F., Heister, K., Schulz, S., Schloter, M., et Kögel-Knabner, I., 2014. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils. Nature Communications [en ligne], volume 5, n° 1. p. 2947. Date de consultation : 16/04/2021. <<https://www.nature.com/articles/ncomms3947>>.

L'introduction d'organismes du sol améliore-t-elle l'effet des amendements organiques sur la croissance du riz cultivé dans un sol déficient en phosphore ?

O. Ratsiatosika^{1,3}, N. Rakotoarivelo¹, V. Herinasandratra¹, T. Razafimbelo¹, P. Autfray², L. Bernard³, J. Trap³, E. Blanchart³

¹ Laboratoire des Radio-Isotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Route d'Andraisoro, 101 Antananarivo, Madagascar

² CIRAD-Aida, Montpellier, France

³ Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAe, IRD, Institut Agro, 2 Place Viala, 34060 Montpellier, France

Mots-Clés : Intensification écologique, Ferralsols, Hautes Terres de Madagascar, Vers de terre, Mycorhizes

Introduction

En agroécologie, différentes pratiques sont généralement proposées pour intensifier écologiquement la production et la durabilité agricole : diminuer le travail du sol, intégrer l'élevage et l'agriculture, pratiquer des rotations, associer des plantes, introduire des plantes pérennes dans les champs ou dans l'exploitation, mieux valoriser les ressources organiques. Peu de pratiques prennent en compte, explicitement, l'intensification écologique du compartiment sol. Cependant, les organismes du sol tiennent un rôle primordial dans la mise en place des biens et services écosystémiques rendus par le sol via leurs fonctions écologiques que sont (i) la dynamique de la matière organique du sol, (ii) le recyclage des nutriments, (iii) le maintien de la structure du sol et (iv) le contrôle des bioagresseurs (Kibblewhite *et al.*, 2008). L'absence ou la réduction des organismes du sol dans les agrosystèmes entraîne un dysfonctionnement des processus écologiques du sol. Il est alors d'une importance capitale de restaurer les fonctions écologiques du sol. Celle-ci peut se faire de deux façons : soit (i) d'une manière directe par l'inoculation d'organismes bénéfiques, mutualistes de la plante, dans le sol (biofertilisation) soit (ii) d'une manière indirecte par l'amélioration de l'habitat des organismes du sol. Actuellement, la biofertilisation apparaît comme une solution potentielle pour répondre aux nombreux défis de l'agriculture. Les Hautes-Terres de Madagascar constituent une région idéale pour tester cette pratique agroécologique innovante. En effet, les agriculteurs exploitent les terres de collines ou « tanety » pour y produire une riziculture pluviale. Or, les sols de tanety des Hautes-Terres sont des sols ferrallitiques acides, fortement désaturés, pauvres en matière organique et en N et P disponibles. Les agriculteurs apportent principalement des amendements organiques pour fertiliser leurs sols. Dans le but de restaurer les fonctions écologiques du sol, l'objectif de cette étude est de tester, dans une démarche agroécologique, l'effet de l'interaction des amendements organiques, vers de terre et mycorhizes sur la croissance du riz pluvial.

Matériels et méthodes

Un essai en mésocosmes (Laboratoire des Radio-Isotopes, Madagascar) pour une durée de huit semaines en février 2019. Trois facteurs » ont été étudiés : (i) amendements organiques (AO) avec onze modalités (Témoin (T), Poudrette de parc (PP), Fumier traditionnel (FuT), Fumier amélioré (FuA), Lisier de porc (LP), Fiente de volaille, (FV), Terreau d'Andralanitra (TA), Taroka (TK), Compost (MC), Vermicompost (VC) et Corne de zébus (CZ)), (ii) vers de terre (VDT) avec deux modalités (absence (V-), présence (V+)) et (iii) mycorhizes (MYC) avec deux modalités (absence (M-), présence (M+)). Les différents amendements organiques utilisés représentent la diversité d'amendements présents dans les Hautes-Terres de Madagascar et que les paysans peuvent utiliser. Ils proviennent essentiellement des fermes paysannes (PP, FT, FA, LP, FV), des produits commerciaux (MC, VC, CZ) et des déchets urbains et agro-industriels (TA et TK). Le TA est un

produit du criblage des déchets prélevés dans les zones de stockage des déchets urbains d'Antananarivo, ayant subi un compostage naturel. Quant au TK, il est issu du compostage de la bagasse de canne à sucre combiné avec le TA. A l'issue de la combinaison des trois facteurs (AO, VDT et MYC), 44 traitements avec 3 répétitions ont été étudiés. Au total, 132 mésocosmes ont été mis en place au cours de cette expérience. Le sol utilisé (1 kg par pot) a été un Ferralsol prélevé à Imerintsiatosika (Région Itasy). Les amendements organiques ont été apportés à une dose équivalente à 6 t MS ha⁻¹. Concernant les vers de terre, trois individus de *Pontoscolex corethrurus* (ver de terre endogé, géophage, de la famille des Rhinodrilidae) ont été introduits dans chaque pot correspondant au traitement V+. Pour les mycorhizes, la souche utilisée a été constituée d'un inoculum commercial de *Rhizophagus irregularis* (Premier Tech, Canada). L'inoculation des grains a été effectuée au début de l'expérience avec une dose de deux spores par grains. Enfin, la variété de riz Chhomrong Dhan a été utilisée avec trois grains par pots. A la fin de l'expérience, les vers de terre ont été comptés dans chaque pot. Les paramètres de croissance (biomasse aérienne (BA), biomasse racinaire (BR), biomasse totale (BT), rapport BA/BR) et de nutrition (quantités de phosphore et d'azote dans la biomasse aérienne) ont été mesurés. En ce qui concerne l'évaluation des mycorhizes, trente fragments de racines par pots ont été prélevés et analysés au microscope afin de calculer la fréquence de mycorhization. Enfin, la taille de l'effet *d* de Cohen a été calculée pour chaque amendement organique avec la formule $d_i = \frac{\text{Moyenne}_i - \text{Moyenne}_{(V-M)}}{\text{Ecartype}_i - \text{Ecartype}_{(V-M)}}$ dont "i" correspond aux traitements V+, M+ et V+M+.

Résultats et discussion

Survie des vers de terre et fréquence de mycorhization

Lors du démontage des mésocosmes, les vers de terre introduits ont presque tous survécu, sauf dans le traitement avec corne de zébu en présence de mycorhize. Le taux de survie moyen des vers de terre a été de 82%. L'apport d'amendements organiques, l'inoculation de mycorhizes ainsi que l'interaction des deux facteurs n'ont pas eu d'effet significatif sur le nombre de vers de terre à la fin de l'expérience. Quant aux mycorhizes, des mycorhizes indigènes ont été observés dans les traitements sans inoculation de mycorhizes, avec une fréquence de mycorhization de 17%. Toutefois, l'inoculation des mycorhizes a montré un effet fortement significatif sur la mycorhization. En effet, la fréquence de mycorhization dans les traitements avec inoculation de mycorhizes a été 2,6 fois plus élevée comparé aux traitements sans inoculation. Par rapport aux amendements organiques, la fréquence de mycorhization la plus élevée a été enregistrée sur le témoin (48%) et la corne de zébus (46%) tandis que la valeur la plus faible a été notée sur le fumier amélioré (11%).

Effet des amendements organiques

Les amendements organiques ont présenté un effet fortement significatif (*p*-value <0,001) sur tous les paramètres étudiés, que ce soit sur les variables de croissance ou de nutrition. D'une manière globale, le lisier de porc et la fiente de volailles ont été les plus performants. Par rapport au traitement témoin, la biomasse totale de ces amendements a été 8 fois plus élevée, la quantité de P dans la biomasse aérienne a également connu une importante augmentation (45 fois pour le LP et 41 fois pour la FV). Pour la nutrition azotée, la corne de zébus et la fiente de volailles ont été classés au premier rang. Leurs quantités de N dans la biomasse aérienne ont été 9 fois plus élevées que celle enregistrée sur le traitement témoin. Ils sont suivis par le lisier de porc qui a augmenté de 7 fois la quantité de N dans la biomasse aérienne. Ces résultats peuvent être expliqués par la différence de qualité entre les amendements organiques, notamment en termes de teneurs en P et N disponibles. Pour le P, le lisier de porc et la fiente de volailles présentent les teneurs les plus élevées parmi tous les amendements (34,6 mg P kg⁻¹ pour FV et 29,8 mg P kg⁻¹ pour LP). Pour le N, la corne de zébu affiche la teneur la plus élevée (155 mg N kg⁻¹) suivie de la fiente de volaille (47,5 mg N kg⁻¹) et du lisier de porc (46,4 mg N kg⁻¹). Les teneurs en P et N des autres AO sont inférieures à 5 mg P kg⁻¹ et 20 mg N kg⁻¹. Malgré la meilleure nutrition azotée du riz ayant reçu le traitement de corne de zébu, la biomasse totale de la plante reste plus faible (1,33 g pot⁻¹) que celles

mesurées sur les traitements avec fiente de volailles (2,52 g pot⁻¹) et de lisier de porc (2,53 g pot⁻¹). Cela supporte l'observation de Raminoarison et al. (2019) qui ont montré que sur le sol d'Itasy, la carence en P est la plus importante parmi tous les nutriments.

Effets seuls des vers de terre et des mycorhizes

Le facteur VDT a eu un effet fortement significatif (p-value <0,001) sur toutes les variables étudiées. L'inoculation des vers de terre a significativement augmenté la biomasse aérienne (+49%), la biomasse racinaire (+21%), la biomasse totale (+40%), le rapport BA/BR (+23%), les quantités de P (+55%) et de N (+87%) dans la biomasse aérienne. L'effet positif de l'inoculation de *P. corethrurus* sur la croissance et la nutrition du riz a été plusieurs fois démontré que ce soit au laboratoire (Ratsiatosika et al., 2021 a) ou au champ (Ratsiatosika et al., 2021 b). L'augmentation de la croissance est notamment liée à l'augmentation de la biodisponibilité en nutriments (N et P) dans le sol, ce qui a été mis en évidence dans notre étude. Pour le facteur MYC, aucun effet significatif n'a été observé sur l'ensemble des paramètres étudiés. Cette observation peut être attribuée à la présence de mycorhizes natifs dans le sol qui masque l'effet seul du mycorhize commercial. En effet, Frew et al. (2020) ont montré que l'utilisation de mycorhize commercial ne permet pas nécessairement d'obtenir un effet plus prononcé que celui des mycorhizes natifs dans le sol.

Effet des interactions entre amendements organiques, vers de terre et mycorhizes

Les interactions entre AO*VDT et AO*MYC ont significativement affecté les biomasses aérienne, racinaire et totale ainsi que les quantités en N et P dans la biomasse aérienne. Aucun effet significatif n'a été trouvé sur l'interaction entre VDT*MYC et l'interaction des 3 facteurs AO*VDT*MYC sur l'ensemble des variables étudiées. Toutefois, il a été remarqué que d'une manière générale les effets des amendements organiques sur la biomasse totale ont augmenté en présence de vers de terre (sauf pour le cas de corne de zébus), mais la taille de l'effet dépend du type d'amendements (Figure 1). Celle-ci est élevée pour le lisier de porc, le terreau d'Andralanitra et la fiente de volailles. En ce qui concerne les mycorhizes, l'inoculum commercial a entraîné globalement une réponse neutre ou négative des amendements organiques dans la production de biomasse totale. Néanmoins, l'inoculation des mycorhizes est favorable dans des situations sans apport d'amendements et permet d'améliorer l'effet du taroka et du lisier de porc sur la biomasse totale du riz. Enfin, pour la co-inoculation de vers de terre et de mycorhizes, la taille de l'effet du traitement varie selon les amendements organiques. En absence d'amendements organiques, la taille de l'effet est négative. A l'inverse, la taille de l'effet des autres types d'amendements organiques associés aux vers de terre et mycorhizes présente la même tendance que celle observée en présence de vers de terre seule. Néanmoins, il est intéressant de noter que le taroka est très performant dans la production de biomasse lorsqu'il est associé aux vers de terre et mycorhizes, avec une taille de l'effet doublée par rapport à la présence de vers de terres seul ou de mycorhize seul.

Ces résultats soulignent l'intérêt que suscite la biofertilisation dans des sols déficients en P en vue d'améliorer la productivité et la durabilité de la fertilité du sol. Toutefois, de nouvelles pistes de recherche sur la valorisation des souches natives de mycorhizes s'avèrent être intéressantes dans une démarche agroécologique afin d'optimiser les fonctions écologiques jouées par les organismes du sol dans les agroécosystèmes.

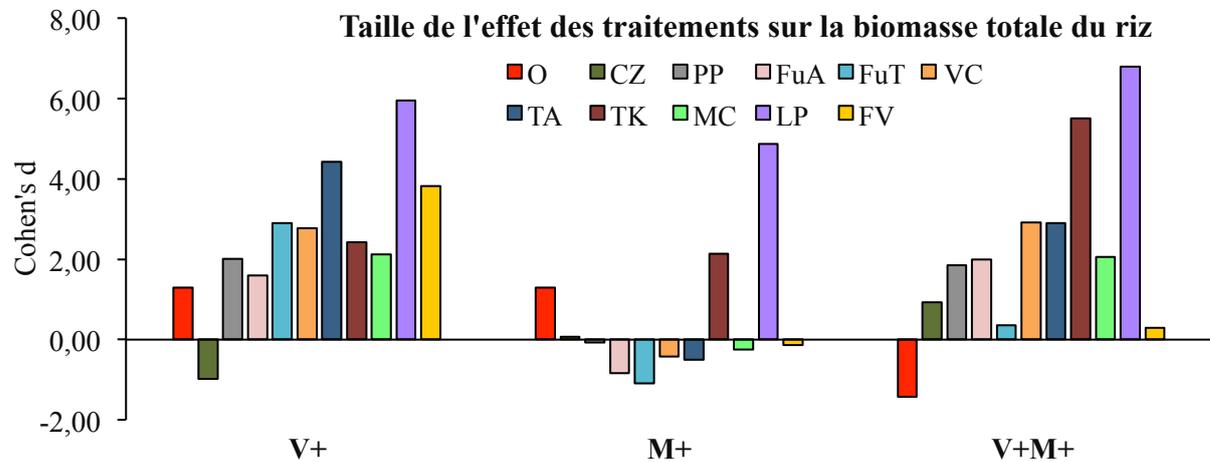


Figure 1 : Taille de l'effet d de Cohen des traitements sur la biomasse totale du riz

Références

- Kibblewhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions Of The Royal Society B-Biological Sciences* 363, 685-701.
- Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., Trap, J., 2020. Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols: a greenhouse nutrient-omission trial. *J. Plant Nutr.* 43, 270–284.
- Ratsiatosika O., Blanchart E, Razafimbelo T., Razafindrakoto M., Vom Brocke K., T-V., Cao-Hamadou, Rakotomalala Andriamarosata J-M., Ramanantsoanirina A., Trap J. 2021a. Does rice breeding affect the ability of plant to interact with earthworms in nutrient-depleted Ferralsols? *Applied soil ecology* 163 103958.
- Ratsiatosika O., Razafindrakoto M., Razafimbelo T., Rabenarivo M., Becquer T., Bernard L., Trap J., Blanchart E. 2021 b. Earthworm inoculation improves upland rice crop yield and other agrosystem services in Madagascar. *Agriculture* 11 (1), 60
- Frew A. 2020. Contrasting effects of commercial and native arbuscular mycorrhizal fungal inoculants on plant biomass allocation, nutrients, and phenolics. *Plants People Planet*.

Minéralisation nette à long-terme du phosphore organique d'un sol cultivé sous fertilisation minérale

Pablo Raguet^{1,2,4}, Alain Mollier¹, Noura Ziadi³, Antoine Karam², Christian Morel¹

¹ INRAE, Bordeaux Science Agro, UMR 1391 ISPA, F-33140, Villenave d'Ornon Cedex, France

² Université Laval, Québec, Québec, Canada

³ Centre de Recherche et Développement de Québec, Agriculture et Agro-alimentaire, Québec, Canada

⁴ 351 cours de la Libération CS 10004, 33405 Talence CEDEX

Mots-Clés : Phosphore organique du sol ; Minéralisation nette ; Essai longue durée ;

Avec environ 30 % du phosphore total sous forme organique, la minéralisation du phosphore (P) organique du sol (POS) est souvent évoquée comme un mécanisme possible de réapprovisionnement de la solution du sol en ions orthophosphates. Ainsi, le POS pourrait contribuer de manière significative au P phytodisponible et participer à la nutrition des plantes cultivées. Toutefois, l'évaluation de la minéralisation nette du POS de la couche labourée a rarement été étudiée sur le long terme (plusieurs décennies) dans des conditions au champ. Les essais longue-durée sont des dispositifs particulièrement pertinents pour étudier la dynamique du POS sur le long terme. La minéralisation nette du POS est la somme de la minéralisation brute du POS, de l'organisation du P dans la biomasse des micro-organismes et de la minéralisation du P de la biomasse des micro-organismes. L'objectif de cette étude est de déterminer les vitesses de minéralisation nettes annuelles du POS dans la couche labourée d'un sol cultivé en fonction de différents régimes de fertilisation phosphatée.

L'étude s'appuie sur les données expérimentales d'un essai conduit sous une monoculture de maïs (*Zea mays* L.) pour une durée de 29 ans. Cet essai a été établi en 1972 dans le Sud-Ouest de la France sur un sol sableux (arénosol luvisol) légèrement acide (pH = 5,9) avec une densité apparente de 1,56 g cm⁻³. Trois régimes de fertilisation minérale de triple superphosphate (Ca(H₂PO₄)₂ H₂O, 20% P) ont été appliqués (0 (P0), 44 (P44), et 96 (P96) kg P ha⁻¹yr⁻¹) dans un dispositif comprenant 4 blocs. Le sol a été cultivé sous une monoculture de maïs irriguée. La couche labourée de sol de chaque parcelle a été échantillonnée à intervalles réguliers (tous les 4 ans environ) sur une profondeur de 25 cm. La teneur de POS a été calculée par la méthode Saunders & Williams (1955). Pour un échantillon, 1g de sol a été calciné à 550 °C pendant 4h. Par la suite, le P des échantillons de sol, un calciné (P total Saunders & Williams, PT_{sw}) et un non calciné (P inorganique du sol Saunders & Williams, PI_{sw}), ont été extraits par une solution de 50 mL de H₂SO₄ à 0.1 M pendant 16h. Le POS_{sw} est ensuite calculé par la différence entre le PT_{sw} et le PI_{sw}. La minéralisation nette du stock du POS_{sw} avec le temps est calculée par régression linéaire où la pente correspond à la minéralisation nette annuelle du POS_{sw}.

La teneur en POS_{sw} initial est de 104 ±25 mg P kg⁻¹ de sol et représente en moyenne 406 ±97 kg P ha⁻¹ dans la couche labourée. Ce compartiment ne varie pas significativement au cours de l'essai pour l'ensemble des traitements (*p-value* = 0,1). Ainsi, le POS_{sw} représente environ 33 % du PT_{sw} du sol dont le stock est de 1283 ±230 kg P ha⁻¹ en moyenne. Toutefois, on observe une tendance à l'augmentation du stock de POS_{sw} de +1,5 (±1,0) kg P ha⁻¹ an⁻¹, ce qui représente une augmentation de +43 kg P ha⁻¹ sur les 29 années de suivi. Le régime de fertilisation n'a pas d'effet significatif sur la minéralisation nette du POS. Les stocks de PT_{sw} et de PI_{sw} sont significativement affectés par le régime de fertilisation phosphatée et par les années. Ainsi, sans apport de P, le stock de PT_{sw} diminue de -12,6 (±3,6) kg P ha⁻¹ an⁻¹. Il augmente de +7,6 (±5,0) et de +22,1 (±5,0) kg P ha⁻¹ an⁻¹ pour P44 et P96, respectivement. Le PI_{sw} suit les mêmes évolutions et les mêmes ordres de

grandeur de $-13,4 (\pm 2,8)$, $+6,2 (\pm 3,9)$ et $+19,9 (\pm 3,9)$ kg P ha⁻¹ an⁻¹ pour P0, P44 et P96, respectivement.

Les résultats présentés dans l'étude montrent une tendance à l'augmentation du stock de POS_{sw}, ce qui a également été observé par Appelhans et al. (2020). Cependant, ces auteurs observent que le régime de fertilisation augmente significativement les vitesses d'organisation : de 6 à 13 kg P ha⁻¹ an⁻¹ pour des apports de 0 et 36 kg de TSP ha⁻¹ an⁻¹ respectivement (extraction au bicarbonate). À l'inverse, certaines études ont rapporté une minéralisation nette qui augmente de quelques kilogrammes en moyenne avec la fertilisation phosphatée (Chater and Mattingly 1980; Song et al. 2011; Zhang and MacKenzie 1997). Ces deux études incluent l'effet de fertilisants organo-minéraux comprenant des fumiers et/ou des phosphates solubles. La tendance à l'augmentation du POS sur 29 ans d'essai peut être expliquée par une incorporation de P (qualifié de P "humifié") au POS (par les apports exogènes, i.e. résidus de culture, ou une organisation de P dans la biomasse microbienne) légèrement supérieure à la minéralisation brute annuelle. Comme le stock de POS est relativement stable sur la durée de l'essai, la variation du PTS_{sw} observée en fonction de l'année et du régime de fertilisation est exclusivement due à la variation du stock de PIS_{sw} (figure 1).

Bien que la vitesse de minéralisation nette du POS ne soit pas significative sur la période étudiée, la minéralisation brute du POS peut toujours avoir lieu et contribuer significativement au réapprovisionnement de la solution du sol en ions orthophosphates. Cette considération impliquerait que le flux de P incorporé au POS et le flux de minéralisation brute soient à l'équilibre dans le système étudié. Ainsi, il est nécessaire de chiffrer et de préciser le flux d'ions orthophosphates issus du processus de minéralisation du POS. Afin d'évaluer les vitesses de minéralisation brute du POS, il est nécessaire de développer un modèle mécaniste et fonctionnel décrivant la dynamique du POS dans la couche labourée des sols de grande culture. Cette évaluation de la vitesse de minéralisation du POS doit être étendue à d'autres types d'agrosystèmes, comprenant d'autres types de sol, successions de cultures, climats et formes de fertilisants phosphatés, notamment les formes organo-minérales dans les produits résiduaux organiques comme les effluents d'élevages.

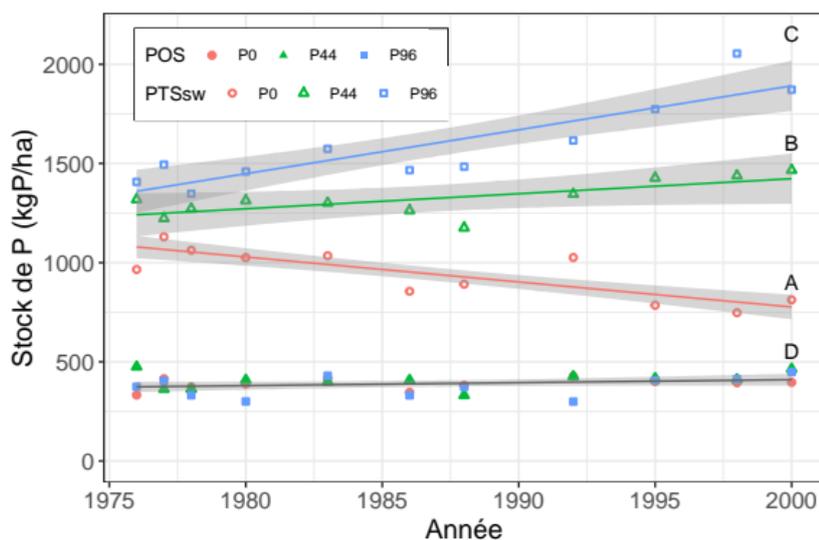


Figure 1: Variations des stocks (kg P ha⁻¹) de P total (TSP_{sw}) et de P organique (POS), déterminés par le méthode de Saunders et Williams (1955) en fonction des années et du régime de fertilisation minérale ; Traitements : P0 = 0 kg P ha⁻¹ an⁻¹, P44 = 44 kg P ha⁻¹ an⁻¹, P96 = 96 kg P ha⁻¹ an⁻¹ ; Pentés des régressions linéaires et ordonnées à l'origine pour l'année 1972 :

- A** (P0, STP_{sw}) = $-12,6 (\pm 3,6) \times \text{année} + 1129 (\pm 62)$, $R^2 = 72$; 11 observations ;
- B** (P44, STP_{sw}) = $+7,6 (\pm 5,0) \times \text{année} + 1211 (\pm 85)$, $R^2 = 72$; 11 observations;
- C** (P96, STP_{sw}) = $+22,1 (\pm 5,0) \times \text{année} + 1271 (\pm 85)$, $R^2 = 72$; 11 observations;
- D** (P0+P44+P96, SOP) = $+1,5 (\pm 1,0) \times \text{année} + 368 (\pm 16)$, $R^2 = 0,02$; 33 observations.

Influence des interactions hydrophobes sur le fonctionnement de phosphatases fongiques

Brice Kedi ^{*1,3}, Joseph Sei ², Siobhán Staunton ¹, Quiquampoix Hervé ¹

¹INRA, UMR Eco&Sols, INRA/IRD/Cirad/Montpellier SupAgro, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France

²LCMI, UFR SSMT, Université Félix Houphouët-Boigny, Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire, bricekedi@yahoo.fr

Mots-Clés : adsorption ; inhibiteur enzymatique ; interactions hydrophobes ; argile ; phosphatase

Introduction

La très faible disponibilité du phosphore (P) dans les sols fait de lui le facteur limitant majeur de la croissance et du développement des plantes dans plusieurs écosystèmes. Les sols tropicaux, dont la minéralogie argileuse est souvent dominés par la kaolinite sont particulièrement sujets à la déficience en phosphore inorganique (Pi), considéré comme la seule forme assimilable par les plantes. La forme organique du phosphore (Po) représente une part important du phosphore du sol (jusqu'à 90% pour certains sols [1]) et peut jouer un rôle important dans la nutrition phosphatée des plantes s'il est hydrolysé en Pi. Les enzymes capables de catalyser l'hydrolyse du Po, les phosphatases, sont produites dans les sols par plusieurs microorganismes dont les champignons ectomycorhiziens. Cependant, l'efficacité des phosphatases à catalyser l'hydrolyse des Po dépend de leur interaction avec les surfaces minérales des sols, en particulier des minéraux argileux. Les champignons ectomycorhiziens produisent et sécrètent des phosphatases acides qui diffèrent dans leur interaction avec les colloïdes des sols, selon les espèces et pour une même espèce [2]. L'objectif de ce travail est d'étudier l'interaction (adsorption et activité catalytique à l'état adsorbé) des phosphatases secrétées par le champignon *Suillus collinitus* à différents niveaux de purification avec deux argiles de référence, la kaolinite et la montmorillonite, qui diffèrent par leur surface spécifique et leur charge de surface.

Matériel et méthodes

Obtention des phosphatases

Les solutions de phosphatases ont été obtenues par culture in vitro à 25° C à l'obscurité pendant 30 jours d'une souche du champignon ectomycorhiziens *Suillus collinitus*. La composition du milieu liquide et du milieu gélosé (agar 16 g/L) est la suivante : NaCl (0,1 mM); KNO₃ (4 mM); KCl (1mM); NH₄Cl (2 mM); MgSO₄ (1 mM); CaCl₂ (1 mM); thiamine-HCl (0,3 μM); citrate ferrique (1%); glucose (10 g/L); KH₂PO₄ (3,4 mM); plus les oligoéléments recommandés par Morizet et Mingeau [3]. A la fin de la culture, les solutions nutritives ont été filtrées sur une toile Vileda-Mop pour l'élimination de débris de champignon, puis conservées par congélation à -20°C.

2.2. Purification et fractionnement des phosphatases

Après décongélation (24 h à 4°C), les solutions de cultures (NP, non purifiées) de *Suillus collinitus* ont été concentrées (40 fois) à l'aide du système de filtration Amicon Ultra 15 kDA (Millipore). Une partie de ces échantillons concentrés (qui constitue le premier niveau de purification et notée AM (pour Amicon) ont été ramenée à la concentration initiale puis utilisée pour les dosages enzymatiques en présence d'argile. Le tampon de chargement dans le chromatographe contenait du sulfate d'ammonium 1M. Le précipité formé au contact de cette solution a été enlevé par centrifugation (15 minutes à 15 000 g) et le surnageant filtré à 0,2 μm avec des filtres Pall Supor®. Le surnageant a été déposé sur une colonne hydrophobe HIC Phenyl 1mL Fast Flow High Sub (GE

Healthcare) montée sur le chromatogramme AKTA Purifier 10 (GE Healthcare). Le tampon de chargement était composé de 25 mM d'acétate de sodium à pH 5 et 1M de sulfate d'ammonium. L'éluion des protéines a été réalisée par 10 mL de tampon acétate (25 mM, pH 5) d'un gradient continu (de 1 à 0 M de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) avec un débit de 1 mL/min.

Les fractions de chromatographie ont été regroupées en quatre groupes (S1, S2, S3 et S4) en se basant sur le profil d'activité et de quantité de protéine. Le groupe S1 n'était pas retenu sur la colonne et était riche en protéines détectables par spectroscopie UV à 280 nm. Les groupes de fractions ont été dessalés et concentrés par quatre passages dans l'Amicon Ultra 10 kDa contre de l'eau ultra pure puis conservés à 4°C.

Préparation des argiles

Les argiles de référence utilisées dans cette étude étaient la kaolinite de Saint-Austell et la montmorillonite du Wyoming. La fraction fine ($< 2 \mu\text{m}$) a été obtenue par sédimentation et la floculation faite avec NaCl. L'excès de sel a ensuite été éliminé par dialyse dans des bains de lavage successifs jusqu'à ce que le test au nitrate d'argent soit négatif. La suspension argileuse était conservée au réfrigérateur pour les dosages enzymatique.

Mesure de l'activité enzymatique

Trois procédures ont été utilisées pour mesurer l'activité en solution, la proportion d'enzymes adsorbées et l'activité des enzymes à l'état adsorbé à chaque pH.

Procédure A: l'activité enzymatique V_A en solution, en l'absence d'argile.

Procédure B: l'activité enzymatique V_B dans une suspension contenant 1 g/L d'argile.

Procédure C: l'activité enzymatique V_C dans le surnageant de la suspension d'argile identique à la procédure B.

Le temps de contact des enzymes avec les argiles avant l'ajout de substrat était de 1 heure. Les particules d'argiles ont été ensuite séparées de la solution, avant l'ajout de substrat dans la procédure C, par centrifugation à 23 000 g pendant 15 minutes. L'activité enzymatique a été mesurée en solution ou en suspension tamponnés aux différents pH avec de l'acétate de sodium à 300 mM. Le substrat utilisé était le paranitrophenyl phosphate (pNPP) avec une concentration dans le mélange réactionnel de 6,7 mM, qui rendait le substrat en large excès. La réaction enzymatique a été fait à 25°C durant 40 minutes et a été stoppée avec du tampon glycine (glycine (133 mM); NaOH (125 mM); NaCl (67 mM); Na_2CO_3 (83 mM) à pH 10.5). L'argile a été séparée du produit formé dans la procédure B par centrifugation comme indiqué ci-dessus avant la mesure de la concentration du produit formé (paranitrophenol pNP) dans chaque procédure. La mesure a été faite à 405 nm à l'aide d'un spectrophotomètre à microplaque (ELx800 de Biotek). Toutes les mesures ont été faites en trois répétitions avec un contrôle approprié.

Résultats

Séparation par chromatographie des phosphatases de *Suillus collinitus*

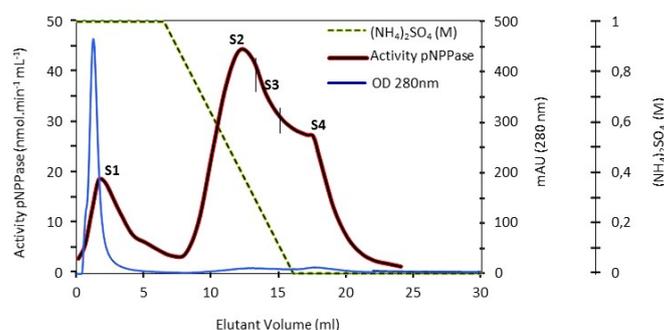


Figure 1: Profil de chromatographie sur une colonne hydrophobe des phosphatases sécrétées par le champignon ectomycorhizien *Suillus collinitus*

La figure 1 présente un profil d'activité de phosphatase et de densité optique des différentes fractions de chromatographie en fonction du volume d'élution et de la concentration de sel $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ nécessaire à l'élution. On distingue trois pics d'activité de phosphatases (S1, S2, S4) dont l'un (S4) apparaît comme l'épaulement d'un autre (S2). La fraction S3 est intermédiaire entre S2 et S4. Le premier pic d'activité (S1) correspond à des phosphatases non retenues sur la colonne qui ont été éluées au maximum de concentration de sel (1M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) et au seul pic de densité optique mesuré à DO 280 nm. Les deux autres pics S2 et S4 correspondent à des phosphatases retenues sur la colonne qui ont été éluées respectivement à 0,7-0,3 M et 0 M de sel. Ces résultats montrent bien que le champignon *Suillus collinitus* a produit et sécrété trois phosphatases acides avec des propriétés hydrophobes différentes. Les phosphatases acides de S4 seraient les plus hydrophobes suivies de celles de S2. Le fait que les phosphatases de S1 ne soient pas retenues suggère qu'elles ne sont pas hydrophobes ou que leur propriété hydrophobe est très faible.

Adsorption et activité des fractions de phosphatases en présence de minéraux argileux en fonction du pH

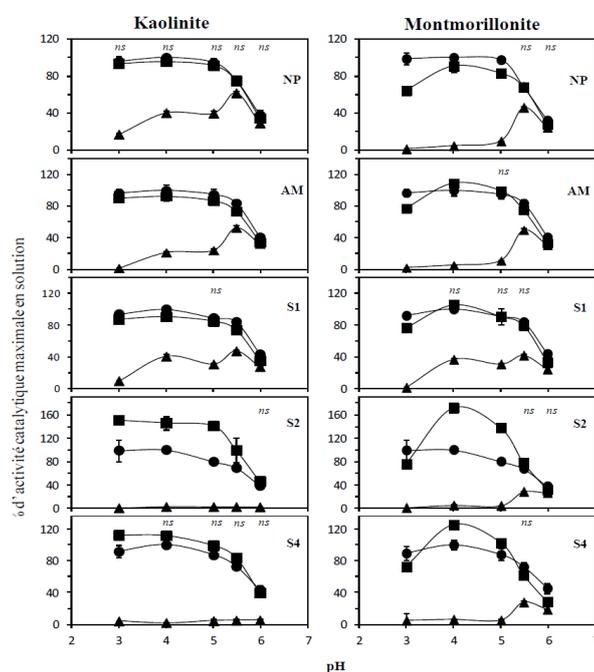


Figure 2: Effet de la kaolinite et de la montmorillonite sur l'activité catalytique en fonction du pH des différentes fractions de phosphatases du champignon ectomycorhizien *Suillus collinitus*. Activité catalytique en solution V_A (cercle), dans la suspension d'argile V_B (carré) et dans le surnageant de la suspension d'argile V_C (triangle).

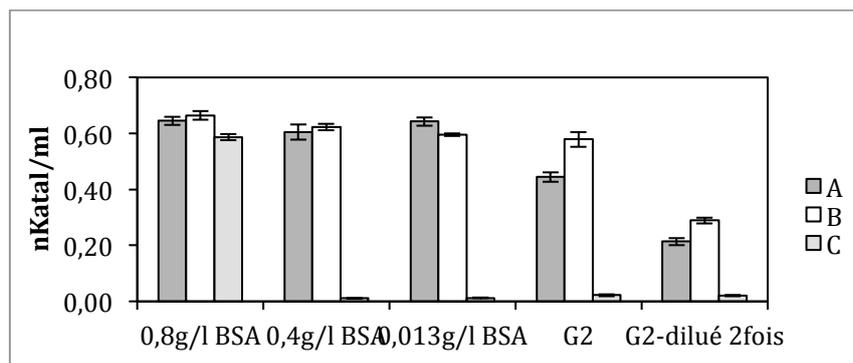


Figure 3: Effet de l'ajout d'albumine de sérum de boeuf (BSA) sur la réaction enzymatique de la fraction S2 en présence de montmorillonite. La concentration de BSA est indiquée. G2 est la réaction enzymatique de S2 en présence de montmorillonite, mais sans BSA ajoutée. A= V_A ; B= V_B ; C= V_C .

Discussion

Affinité des phosphatases pour les minéraux argileux

Les échantillons de phosphatases NP, AM et S1 ont un comportement similaire en présence de chacun des argiles. Leur affinité avec les argiles diminue quand le pH augmente. Leur affinité est généralement plus forte avec la montmorillonite qu'avec la kaolinite entre les pH 3 et 5 (Fig.2). Par contre pour les échantillons S2 et S4, l'affinité est la même pour les deux argiles, ce qui est certainement due au faible rapport protéine/argile comparé à celui des échantillons NP, AM et S1. La différence d'affinité des enzymes pour les argiles peut s'expliquer par les charges caractéristiques des surfaces des argiles qui influencent les interactions électrostatiques. A un pH acide, les charges positives de l'enzyme augmentent, ce qui conduit à une plus forte attraction avec les charges négatives de la montmorillonite. Lorsque le pH tend vers les pH alcalins, les charges négatives de l'enzyme augmentent ce qui conduit à une diminution de l'interaction avec la montmorillonite [4]. Cette tendance est un peu moins marquée pour la kaolinite.

Activité des phosphatases en contact avec les argiles

D'une manière générale, il n'y a pas eu de perte d'activité des phosphatases ($V_B \approx V_A$) du fait de leur contact avec les surfaces des argiles comme il est souvent rapporté dans la littérature. En effet, les observations habituelles font état soit d'une perte d'activité des enzymes une fois adsorbées sur les surfaces solides notamment les argiles [4, 5], soit d'un maintien. De plus, une augmentation d'activité des phosphatases adsorbées sur les argiles est apparemment observée (Fig.2). Peu d'études ont rapporté un effet amplificateur d'activité d'enzymes par les argiles. L'effet amplificateur d'activité catalytique n'est observé dans cette étude que pour les phosphatases retenues sur la colonne hydrophobe lors de la séparation par chromatographie (S2 et S4). Une hypothèse plausible pour expliquer ce phénomène aurait pu être une dimérisation des phosphatases sur la surface minérale avec pour résultat une activité enzymatique supérieure comme cela peut être souvent le cas avec les dimères. Mais une expérience complémentaire (Fig.3) dans laquelle on a étudié l'effet de l'ajout de BSA, une protéine connue pour ses propriétés fixatrices de molécules lipophiles, indique une autre hypothèse explicative. En effet la présence de BSA abolit totalement l'effet activateur sur l'activité enzymatique de S2 de l'adsorption sur la montmorillonite. Nous sommes donc conduits à interpréter cet effet activateur comme résultant non pas d'une dimérisation sur la surface de l'enzyme, mais d'une adsorption d'un inhibiteur de nature lipophile co-concentré avec S2 lors de la séparation chromatographique sur colonne hydrophobe.

Références

- [1] Condon, L. M. & Tiessen, H. *In* Organic phosphorus in the environment (Eds.: B. L. Turner, E. Frossard, D. S. Baldwin), CABI Publishing, Wallingford UK, 2005, pp. 295.
- [2] Quiquampoix, H. & Burns, R. G. *Elements* 2007, 3, 401.
- [3] Morizet, J. & Mingeau, M. *Annales Agronomiques* 1976, 27, 183.
- [4] Leprince, F. & Quiquampoix, H. *European Journal of Soil Science* 1996, 47, 511.
- [5] Kelleher, B. P., Willeford, K. O., Simpson, A. J., Simpson, M. J., Stout, R., Rafferty, A. & Kingery, W. L. *Biogeochemistry* 2004, 71, 285.

Intérêt des techniques d'analyse thermique pour déterminer la stabilité biogéochimique pluri-décennale du carbone organique des sols

Amicie Delahaie¹, Pierre Barré¹, Lauric Cécillon^{1,2}

¹ Laboratoire de Géologie, École Normale Supérieure, CNRS, PSL Univ., IPSL, Paris, France

² Normandie Univ., UNIROUEN, INRAE, ECODIV, Rouen, France

Mots-Clés : carbone organique des sols ; stabilité biogéochimique ; analyse thermique ; carbone stable ; revue bibliographique.

Introduction

La dynamique du carbone dans les sols est un enjeu majeur tant d'un point de vue climatique qu'agricole. En effet, une augmentation des stocks de carbone organique des sols (COS) est souhaitable pour améliorer la qualité des sols et contribuer à atténuer le changement climatique. Pour évaluer le risque de perte en COS d'un sol ou son potentiel de gain, il est nécessaire d'évaluer la stabilité biogéochimique du COS qu'il contient : il faut donc pouvoir différencier le carbone « actif », avec un temps moyen de résidence de quelques années à quelques décennies, du carbone « stable », avec un temps moyen de résidence d'un à plusieurs siècles.

Aujourd'hui, de nombreuses techniques sont utilisées pour estimer la taille de ces compartiments de COS. Ces techniques peuvent s'avérer imprécises, coûteuses, chronophages ou complexes. Les techniques d'analyse thermique pourraient représenter une alternative intéressante à ces techniques : elles permettent d'analyser un grand nombre d'échantillons de manière reproductible, assez rapidement et à moindre coût (Plante *et al.*, 2009). Si l'on montre que les résultats d'estimation de la stabilité biogéochimique du COS fournis par les techniques d'analyse thermique sont corrélés à ceux obtenus par les techniques conventionnelles, ces dernières pourraient ainsi être avantageusement proposées comme des alternatives pertinentes. Ce travail est une revue des résultats publiés dans la littérature permettant de comparer des résultats de différentes techniques d'analyse thermique à des quantifications de la stabilité biogéochimique du COS déterminées par des techniques plus établies. Son objectif est de déterminer si certaines techniques d'analyse thermique permettent d'évaluer la stabilité biogéochimique du COS.

Matériel et Méthodes

À ce jour, nous avons rassemblé 43 articles comparant les résultats d'une ou plusieurs techniques d'analyse thermique à une ou plusieurs techniques « conventionnelles » permettant l'évaluation de la stabilité biogéochimique du COS.

Parmi ces techniques « conventionnelles » figurent :

- les analyses de respiration biologique mesurées dans le cadre d'incubations ;
- les techniques isotopiques (¹⁴C ou d¹³C dans le cadre de chronoséquences de plantes en C3-C4) ;
- les méthodes de séparation chimiques : extraction à l'eau ou à l'aide d'agents acido-basiques ou oxydo-réducteurs, etc. ;
- les méthodes de séparation physiques : granulométrie, densimétrie, etc. ;
- les gradients de COS : par exemple comparaison d'échantillons maintenus en jachère nue pendant des durées différentes, ou d'échantillons prélevés en surface et en profondeur.

Les techniques d'analyse thermique recouvrent quant à elles en majorité :

- le suivi de la perte en masse d'un échantillon lors de sa montée en température (thermogravimétrie (TG)) ;
- la mesure et la caractérisation des gaz générés par l'échantillon lors de sa montée en température (EGA pour evolved gas analysis) ;
- la mesure de la chaleur générée par la combustion de l'échantillon (calorimétrie différentielle à balayage (DSC, pour differential scanning calorimetry)).

Système d'évaluation du lien entre stabilité biogéochimique mesurée par analyse thermique et par la technique « conventionnelle »

Nous avons testé les hypothèses selon lesquelles le COS plus stable au plan biogéochimique est aussi plus stable thermiquement et que sa combustion génère moins d'énergie (Barré *et al.*, 2016). Dans chacun des articles, nous avons évalué les liens entre stabilité biogéochimique déterminée par la méthode « conventionnelle » et résultats d'analyse thermique suivant plusieurs critères (Figure 1).

Dans un premier temps, la relation entre les résultats de la méthode d'analyse thermique considérée et ceux de la technique conventionnelle associée est notée entre 0 et 20 en fonction du coefficient de corrélation R ou du critère p (dans le cas des ANOVA). Un coefficient, valant 1 ou -1, est appliqué à cette note afin d'indiquer si la relation entre les résultats de la méthode d'analyse thermique et ceux de la technique conventionnelle va dans le sens attendu ou le sens inverse à nos hypothèses. La note de -20 indique ainsi une corrélation très forte entre les résultats de la méthode d'analyse thermique et ceux de la technique conventionnelle, mais cette corrélation allant dans le sens inverse à nos hypothèses (par exemple si des sols ayant des proportions de carbone organique particulaire (MOP) fortes ont une stabilité thermique plus forte que des sols pauvres en MOP). La note de 0 indique une absence de corrélation, et la note de 20 une corrélation très forte allant dans le sens attendu.

Cette note est ensuite réévaluée en fonction de 2 coefficients correcteurs :

- la robustesse de la comparaison : ce coefficient est divisé en 2 sous-facteurs de correction. L'un évalue un critère de robustesse de la technique conventionnelle, allant de notes faibles (à partir de 0.1) pour les techniques qui isolent mal le C stable à l'échelle pluri-décennale, à 1 pour les techniques les plus robustes (jachères nues de longue durée, transition C3-C4 de longue durée). L'autre sous-facteur de correction, valant 0 ou 1, note la pertinence de l'indicateur utilisé : il sanctionne uniquement les indicateurs non normalisés à la quantité de COS ;
- la généralité des données : ce coefficient est divisé en 5 sous-facteurs récompensant respectivement le nombre d'échantillons, la diversité des types de sol, d'usage des sols, de climat et de profondeur du sol, de sorte à donner plus de poids aux études plus génériques ;



Figure 1 : Système de notation composé d'une note assortie de deux coefficients correcteurs (Robustesse et Généricité). Leur produit fournit une note globale entre -20 et 20.

Chaque article scientifique inclus dans notre revue pouvant présenter plusieurs comparaisons de techniques d'analyse thermique et de techniques conventionnelles, les études utilisant parfois plusieurs indicateurs, les notes ne sont pas attribuées par article ou par méthode mais bien par paire d'indicateurs comparés, au nombre de 181 à ce jour. Les paires d'indicateurs notées à 0 à cause d'une absence de corrélation sont prises en compte dans notre étude ; en revanche, celles notées à 0 car non pertinentes pour cette revue (indicateurs non normalisés à la quantité de COS, par exemple) seront retirées afin de ne pas fausser les conclusions de notre étude.

Premiers résultats, conclusion et perspectives

Les articles sont étudiés individuellement, puis résumés en caractéristiques aussi objectives que possible, auxquelles sont attribuées les notes et coefficients décrits ci-dessus. Ces derniers peuvent être facilement modifiés à l'intérieur du tableau de notation ; les changements sont aussitôt reportés dans la feuille d'étude des articles afin de voir immédiatement apparaître les nouvelles notes globales calculées pour chaque paire d'indicateurs comparés.

L'analyse de la distribution de l'ensemble de ces notes globales fournira à terme une évaluation quantitative de la capacité des techniques d'analyse thermique à mesurer la stabilité biogéochimique pluri-décennale du COS. Différents paliers de satisfaction (insuffisant, moyen, bon, excellent) seront définis *a priori* pour cette évaluation quantitative. Le travail de notation des différentes paires d'indicateurs comparés est en cours, les premiers résultats seront présentés lors des JNES.

Références

- Plante A. F. *et al.*, 2009. Application of thermal analysis techniques in soil science. *Geoderma* 153, 1-10.
- Barré P. *et al.*, 2016. The energetic and chemical signatures of persistent soil organic matter. *Biogeochemistry* 130, 1-12.

Dynamique de la perte de C du sol par changement d'usage forêt /vigne à échelle centennale ; apport des approches par radiocarbone

Solène Quéro¹, Christine Hatté², Sophie Cornu¹, Nithavong Cam³, Adrien Duvivier¹, Daniel Borschneck¹, Isabelle Basile-Doelsch¹

- (1) Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France
- (2) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 8212 CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France.
- (3) PLACAMAT UMS 3626, Univ. Bordeaux, CNRS ; 87 avenue Albert Schweitzer, 33600 Pessac, France

Mots-Clés : dynamique du carbone, radiocarbone, stockage du carbone, changement d'usage, arénosol

Les terres cultivées représentent 1500 millions d'hectares dans le monde et la FAO estime qu'il faudra augmenter cette surface de 8%, d'ici 2050, afin de répondre à la croissance démographique [1]. Or, la conversion de terres arables peu anthropisées, comme des forêts, vers des cultures, a entre autres comme conséquence une perte importante et rapide de carbone organique (pouvant aller jusqu'à 50% en 10 ans), qui s'accompagne d'une détérioration des services écosystémiques des sols [2]. Les mécanismes qui contrôlent la dynamique du carbone suite à un changement d'usage sont encore mal compris. L'abondance naturelle du radiocarbone (¹⁴C) est utile pour suivre cette dynamique, mais les données sur le système sol sont encore relativement rares, en particulier à l'échelle d'un horizon [3]. C'est pourquoi cette étude explore l'évolution des teneurs en carbone et en radiocarbone à l'échelle du profil de sol et à l'échelle de l'horizon dans un sol ayant subi, il y a plus de 100 ans, un changement d'usage d'une forêt vers une vigne.

Une approche par paire (deux parcelles distantes de 15m sur une topographie plane avec des utilisations différentes des terres) a été choisie. Le site est localisé au Plan de la Tour (83), dans le massif des Maures (France), sous climat méditerranéen ($-3^{\circ}\text{C} < T_{\text{hiver}} < 18^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{été}} > 22^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{mois le plus sec}} < 40 \text{ mm}$). Le sol est un arénosol peu différencié sur granite. L'analyse des photos aériennes et des cartes cadastrales (de 1815 à nos jours) montre que ces deux parcelles ont connu le même usage des sols depuis environ 100 ans. Des travaux complémentaires de terrain ont permis d'écarter l'effet d'un terrassement aux points d'échantillonnage sélectionnés. La parcelle en vigne subit un labour profond (50 cm) tous les 70 ans en moyenne et le sol est à nu en interrang. Sur chaque site (forêt et vigne), une fosse a permis l'échantillonnage des sols (sur 3 faces) jusqu'à une profondeur de 80 cm environ.

La distribution des teneurs en carbone organique dans les sols est très contrastée entre les deux utilisations des terres. Les teneurs sous vigne sont significativement plus faibles que celles sous forêt sur l'ensemble du profil (23 fois plus basses pour le 0-5 cm) et ce, même en profondeur. La mise en culture a donc provoqué une perte importante de carbone ($-52 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sur les 30 premiers centimètres).

Le F¹⁴C sous forêt montre un profil classique (Figure 1) avec la présence de carbone « jeune » en surface, devenant de plus en plus « vieux » avec la profondeur (F¹⁴C < 1 autour de 40 cm) [4]. Celui sous vigne, au contraire indique, malgré les hétérogénéités au sein des horizons, la présence de carbone ancien de la surface jusqu'au fond de la fosse (F¹⁴C entre 0,893 et 0,99). Les pratiques agricoles ont donc induit la perte du pool de MO le plus jeune, les pools de carbone restants, distribués aléatoirement au sein du profil, ayant des turnovers compris entre 300 ans et 3000 ans [5].

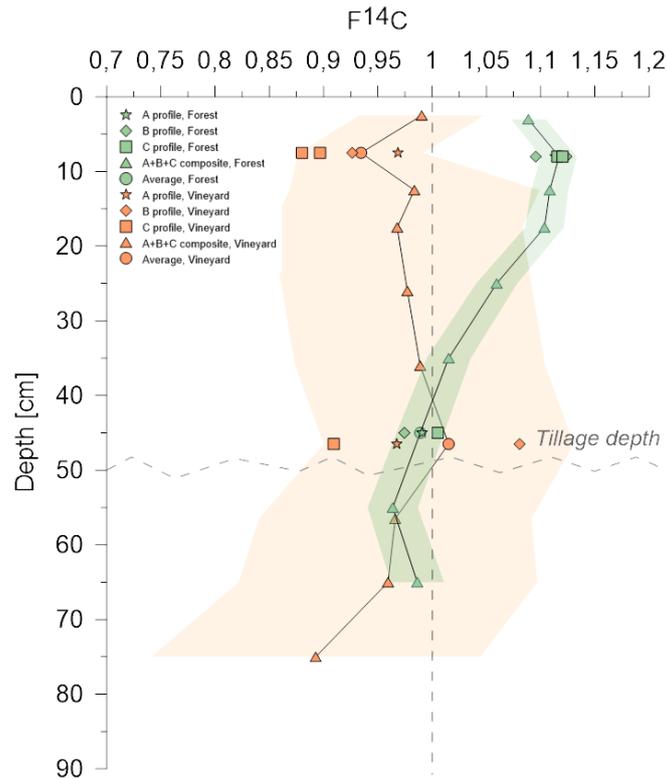


Figure 1 : Comparaison de l' évolution du F14C en fonction de la profondeur, forêt et vignoble, et hétérogénéité du F^{14}C selon le type de couverture végétale.

Remerciements

Nous tenons à remercier Jérôme Balesdent, qui nous a malheureusement quitté trop vite, pour son aide précieuse sur tous les aspects de ce travail. Nous remercions également M. Février et M. Coulomb, président de la coopérative des Vignerons du Plan de la Tour, de nous avoir autorisé à échantillonner dans leurs parcelles. Ce travail est financé par l'ANR (projet NanoSoilC ANR-16-CE01-0012-02) et soutenu par l'Université d'Aix-Marseille.

Références

- [1] The future of food and agriculture, alternative pathways to 2050. Food & Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2018.
- [2] Lal, R., Carbon Management, 4 (2013), 439–462.
- [3] Shi, Z., Allison, S.D., He, Y., Levine, P.A., Hoyt, A.M., Beem-Miller, J., Zhu, Q., Wieder, W.R., Trumbore, S., Randerson, J.T., Nature Geoscience, (2020).
- [4] Mathieu, J.A., Hatté, C., Balesdent, J., Parent, É., Global Change Biology, 21 (2015), 4278–4292.
- [5] Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Chadoeuf, J., Cornu, S., Derrien, D., Fekiacova, Z., Hatté, C., Nature, 559 (2018), 599–60

Améliorer la précision des modèles de dynamique du carbone organique du sol à l'aide d'une méthode d'initialisation robuste

Eva Kanari^{1,2*}, Lauric Cécillon^{1,3*}, François Baudin², Hugues Clivot⁴, Fabien Ferchaud⁵, Sabine Houot⁶, Florent Levavasseur⁶, Bruno Mary⁵, Laure Soucémarianadin⁷, Claire Chenu⁶, Pierre Barré^{1*}

¹ Laboratoire de Géologie, École normale supérieure, CNRS, Université PSL, IPSL, Paris, France

² ISTeP, Sorbonne Université, CNRS, Paris, France

³ Normandie Univ, UNIROUEN, INRAE, ECODIV, Rouen, France

⁴ Université de Reims Champagne Ardennes, INRAE, FARE, Reims, France

⁵ BioEcoAgro Joint Research Unit, INRAE, Université de Liège, Université de Lille, Université Picardie Jules Verne, Barenton-Bugny, France

⁶ ECOSYS, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Thiverval-Grignon, France

⁷ ACTA - les instituts techniques agricoles, Paris, France

Mots-Clés : compartiments cinétiques du COS, stabilité du COS, Rock-Eval®, modèle AMG

De nombreux facteurs influencent la stabilité du carbone organique des sols (COS), résultant en des temps de résidence du COS très variables, allant de quelques heures à des millénaires. De ce fait les modèles de dynamique du COS divisent souvent le COS dans des compartiments aux temps de résidences contrastés. La paramétrisation initiale de ces modèles, à savoir le partitionnement du COS dans des compartiments de stabilité différente au début de la simulation, sont importantes pour la précision des simulations¹. Les méthodes actuellement utilisées pour estimer la taille des compartiments cinétiques des modèles de dynamique du COS sont généralement indirectes et laborieuses, très peu validées et non-normalisées. Récemment, l'analyse thermique Rock-Eval® a été proposée comme une méthode rapide et peu coûteuse pour évaluer la stabilité du COS². Sur la base de cette technique, un modèle d'apprentissage (PARTY_{SOC}) permettant de relier les résultats d'une analyse Rock-Eval® à la quantité du COS persistant à l'échelle du siècle a été développé^{3,4}. Ce modèle d'apprentissage utilise principalement des échantillons issus de jachères nues de longues durées en Europe.

Dans ce travail, nous démontrons que le modèle PARTY_{SOC} estime de manière optimale la taille initiale des compartiments d'un modèle de la dynamique du COS simple et bien validé (AMG)⁵ (Figure 1), au sein de 32 traitements de neuf essais agronomiques de long terme en France (durée médiane des essais : 21 ans), en tenant compte des effets de l'historique d'usage et de gestion du sol. En outre, nous avons constaté que l'initialisation de la taille des compartiments du COS à l'aide de cette méthode améliore la précision des simulations du COS, permettant de reproduire fidèlement les changements observés de stock du COS. Cette stratégie peut être facilement appliquée sur de grands réseaux de surveillance des sols, permettant des prédictions plus précises de l'évolution des stocks du COS au cours des prochaines décennies.

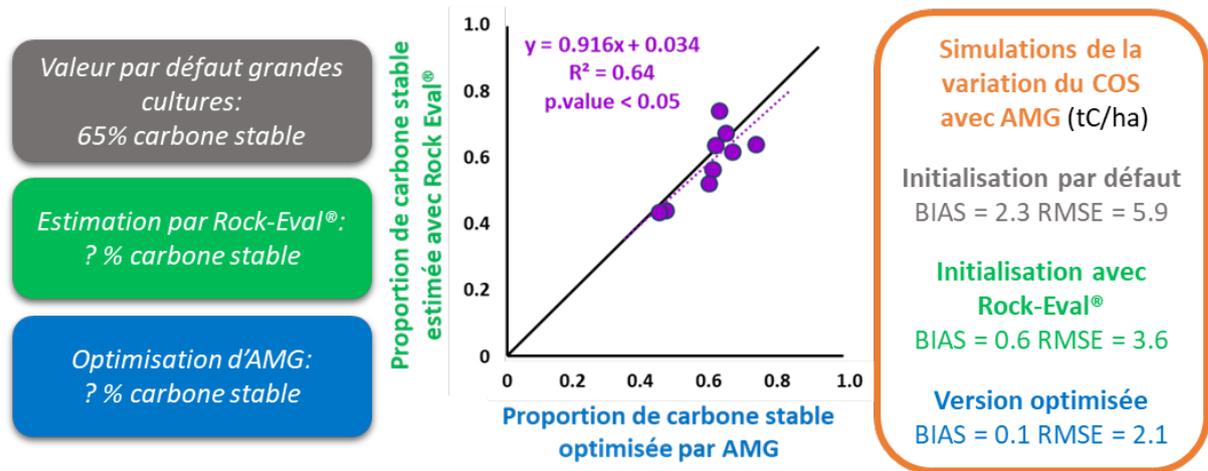


Figure 1 : L'initialisation du modèle AMG par PARTY_{SOC} est optimale et permet une amélioration significative de la qualité des simulations dans les agrosystèmes français

Références

1. Clivot, H. *et al.* Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environ. Model. Softw.* **118**, 99–113 (2019).
2. Barré, P. *et al.* The energetic and chemical signatures of persistent soil organic matter. *Biogeochemistry* **130**, (2016).
3. Cécillon, L. *et al.* A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences* **15**, 2835–2849 (2018).
4. Cécillon, L. *et al.* Partitioning soil organic carbon into its centennially stable and active fractions with statistical models based on Rock-Eval® thermal analysis (PARTY_{SOC}v2.0 and PARTY_{SOC}v2.0_{EU}). *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2021, 1–35 (2021).
5. Andriulo, A. E., Mary, B. & Guerif, J. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* **19**, 365–377 (1999).

Potentialités de (dé)stockage du carbone dans les sols agricoles de La Réunion. Approche spatiale et spectroscopie moyen infra-rouge.

Myriam Allo^{1,2}, Pierre Todoroff¹, Kenji Fujisaki³, Alain Albrecht³

¹ CIRAD, UPR AIDA, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France. AIDA, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

² ADEME, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé, BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

³ UMR Eco&Sols, IRD, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, F 97410 Saint-Pierre, Réunion, France.

Mots-clés : Stratification ; Spatialisation ; Spectroscopie moyen infra-rouge ; (variation des) Stocks de carbone organique du sol ; Changements d'usages des sols.

Dans le cadre de « l'Initiative 4p1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », l'évaluation des stocks de carbone organique des sols agricoles à l'échelle territoriale est un enjeu méthodologique, notamment dans le cas d'un territoire où les déterminants du carbone organique du sol (COS), tels que le type de sol et le climat, sont spatialement très hétérogènes, comme sur l'île de La Réunion. D'autre part, le sens et l'ampleur des effets des changements d'usages sur les stocks de carbone des sols tropicaux sont méconnus, notamment parce que les facteurs biophysiques affectant le stockage du carbone organique du sol ne sont pas pris en compte dans les méthodes d'estimation actuelles, empêchant ainsi l'extrapolation à des régions présentant des conditions biophysiques différentes. La préexistence d'une base de données d'analyses de sol sur ce territoire présentant une grande diversité pédologique et climatique, recoupant pour une grande part celles des régions tropicales, semblaient être une opportunité pour (1) éprouver un outil simple à fort potentiel dans l'évaluation des stocks de carbone organique du sol à l'échelle territoriale : la spectroscopie moyen infrarouge ; (2) développer des méthodes d'estimation des variations de stock de carbone du sol sous l'effet de changement d'usages dans des conditions pédoclimatiques contrastées.

L'objectif de cette étude est de montrer que la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des déterminants des stocks de carbone du sol est possible pour (1) estimer les stocks de carbone organique des sols agricoles et (2) estimer les effets des changements d'usages du sol sur les stocks de carbone, en faisant appel à la spectroscopie moyen infrarouge.

A partir d'un jeu de données de 8 742 analyses d'échantillons de sol géoréférencés de profondeur 0-30 cm et provenant de parcelles agricoles de différents usages réparties sur l'ensemble des surfaces cultivées de La Réunion, la spectroscopie moyen infra-rouge combinée à des méthodes statistiques de classification a permis de spatialiser des unités pédologiques homogènes. D'autre part, la spectroscopie moyen infra-rouge ayant montré sa pertinence pour la prédiction de la densité apparente pour les sols agricoles de La Réunion (Allo et al., 2020), une densité apparente moyenne a été affectée à chaque groupe de sol. Les stocks de COS ont ensuite été calculés à partir des teneurs en COS des 8 742 analyses d'échantillons de sol géoréférencées. Une méthode de stratification du territoire à partir des déterminants du COS (pédologie et climat) a permis de définir des unités spatiales homogènes vis-à-vis du carbone organique du sol, appelées unités pédoclimatiques. Toutefois, la variabilité des stocks de COS restant encore très élevée dans chaque unité pédoclimatique, les variations de stocks de COS entre le mode d'usage de référence (la canne à sucre étant une monoculture depuis plus de 200 ans à La Réunion) et les autres modes d'usages (ananas, maraichage, prairie, verger), ont été déterminés en sélectionnant par requête spatiale des couples d'échantillons (canne et autre usage) dans un rayon de 1 km.

La spectroscopie moyen infrarouge, couplée à une méthodologie de stratification du territoire à partir des déterminants du COS (pédologie et climat) en unités pédoclimatiques a ainsi permis de (1) quantifier les stocks de COS à l'échelle du territoire, et (2) d'évaluer les variations de stocks de COS par unité pédoclimatique. Les sols agricoles de La Réunion présentent **des stocks de COS très élevés**, avec un stock de COS moyen sous canne à sucre (culture majoritaire de l'île) de $132 \pm 66 \text{ MgC ha}^{-1}$, tandis que le stock de COS total des sols agricoles de La Réunion est estimé à 7,55 MtC pour une surface de 46 536 ha.

Tableau 1 : Statistiques descriptives des stocks et quantités de COS par unité pédologique spectrale et mode d'usage agricole. La nomenclature des unités pédologiques spectrales indique la nature du minéral (para)cristallin principal par une lettre majuscule (A : allophanes ; G : gibbsite ; H : halloysite) et l'information minéralogique secondaire, si identifiée, par une lettre minuscule (a : allophanes ; g : gibbsite ; h : halloysite hydratée (10Å) ; i : argiles 2:1 ou 2:1:1 en couches interstratifiées). A noter que l'unité spectrale « P », étant un cas particulier de sols sur alluvions, n'est pas représentée dans ce tableau.

Unité pédologique spectrale	Mode d'usage	Stock COS moyen	Stock COS écart-type	Coefficient de variation du stock COS	Effectif	Quantité de COS	Surface
		MgC ha ⁻¹	MgC ha ⁻¹			MgC	(ha)
Ga		101	25		511	262707	2519
	ananas	93,01	29,3	0,32	15	6755	73
	canne	104,94	30,04	0,29	479	181614	1732
	maraichage	100,01	26,34	0,26	6	14524	145
	prairie	101,19	10,06	0,10	4	25067	248
	verger	108,09	28,87	0,27	7	34748	321
Aa		231	68		1830	4236520	17125
	ananas	197,91	59,83	0,30	69	19587	99
	canne	215,48	66,02	0,31	1578	1345370	6215
	maraichage	225,95	64,22	0,28	70	233115	1011
	prairie	289,61	64,27	0,22	31	1731311	5865
	verger	226,79	84,67	0,37	82	907138	3936
A		128	40		605	331323	2605
	ananas	119,62	31,4	0,26	11	1736	16
	canne	128,49	44,84	0,35	536	232693	1769
	maraichage	144,7	41,7	0,29	20	21360	165
	verger	118,05	42,85	0,36	38	75534	655
Ag		154	40		994	805528	5151
	ananas	106,65	40,92	0,38	29	4306	39
	canne	149,22	48,3	0,32	890	418420	2805
	maraichage	161,04	35,88	0,22	26	48106	299
	prairie	196,1	36,63	0,19	8	135208	701
	verger	158,49	40,08	0,25	41	199488	1308
Gh		101	27		499	212252	2103
	ananas	98,5	23,35	0,24	15	3540	36
	canne	100,34	26,55	0,26	472	181087	1800
	maraichage	97,07	19,4	0,20	5	7250	75

H	verger	106,34	40,27	0,38	7	20374	192
		92	39		2393	898436	10194
	ananas	76,87	24,36	0,32	62	10969	146
	canne	86,33	27,03	0,31	2238	560588	6448
	maraichage	69,95	21,58	0,31	51	59693	820
	prairie	134,71	80,85	0,60	9	66031	547
Hh	verger	91,11	41,73	0,46	33	201154	2233
		123	38		586	238166	1944
	ananas	117,56	38,97	0,33	6	1595	14
	canne	119,27	36,15	0,30	555	176058	1477
	maraichage	141,78	41,13	0,29	13	13442	91
	verger	113,85	36,05	0,32	12	47071	363
Hi		86	51		251	113765	1235
	ananas	76,41	28,68	0,38	7	1976	26
	canne	85,8	32,47	0,38	225	50869	593
	maraichage	77,93	47,27	0,61	8	10227	131
	verger	104,47	96,74	0,93	11	50693	485

Une comparaison des stocks de La Réunion avec des stocks de pédogenèses volcaniques tropicales similaires (Martinique, Guadeloupe) semblent également montrer des stocks plus élevés que ceux mesurés à La Martinique par type de sol (Albrecht et al., 1992; Blanchart and Bernoux, 2005) et à La Guadeloupe par type de sol et usage (Sierra et al., 2015). Toutefois, la **variabilité des stocks de COS est importante**, avec des stocks de COS moyens par unité pédologique et par mode d'usage des sols agricoles de La Réunion variant de 70 à 290 MgC ha⁻¹ (cf. Tableau 1). Sous canne à sucre, culture majoritaire et présente dans toutes les unités pédoclimatiques, les stocks de carbone moyens par unité pédoclimatique varient de 86 à 216 MgC ha⁻¹. En termes de quantités de COS, les résultats de cette étude montrent que le carbone contenu dans les trente premiers centimètres des sols à caractère andique (Aa, A et Ag) représente 71 % du carbone des sols et 54 % des surfaces du terroir agricole. Les sols à halloysite (H, Hh et Hi) représentent l'autre part importante du carbone du sol (17%) sur 29% des surfaces agricoles tandis que les sols à gibbsite (Ga et Gh) représentent 6% de la quantité de carbone du sol pour 10% des surfaces. Néanmoins, si les stocks de COS des sols cultivés de La Réunion sont très élevés (cf. Tableau 1), ils **restent vulnérables**. En effet, les principaux changements observés et attendus ces prochaines décennies dans le secteur agricole à La Réunion sont des conversions des surfaces actuellement en canne à sucre vers des surfaces cultivées selon d'autres usages agricoles. Or, les variations des stocks de COS par unité pédoclimatique ont montré des différences importantes allant de -41 à +28 % du stock sous canne à sucre (-21 MgC ha⁻¹ en moyenne toutes unités pédoclimatiques et usages confondus). L'analyse des différences de stocks semble indiquer que le déstockage du COS est plus important pour des changements d'usages vers l'ananas (déstockage moyen de -26 MgC ha⁻¹ toutes unités pédoclimatiques confondues) et vers le maraichage (déstockage moyen de -37 MgC ha⁻¹ toutes unités pédoclimatiques confondues). Cependant, si ces résultats indiquent que les sols agricoles de La Réunion sont **sensibles aux changements d'usages agricoles de la canne à sucre vers d'autres usages**, la variabilité des stocks de COS étant très importante, l'évaluation des variations de stocks de COS entre différents modes d'usage agricole reste complexe, seules 12 variations de stock de COS significativement différentes entre différents modes d'usage ont été observées dans 10 unités pédoclimatiques.

A l'échelle territoriale, si la connaissance des stocks de COS ainsi que les potentialités de stockage ou de déstockage de COS dans les sols agricoles est un enjeu méthodologique majeur pouvant être

résolu par une approche spatiale, couplée à des outils tels que la spectroscopie moyen infrarouge, la protection des sols, notamment ceux ayant des stocks de COS élevés, reste primordiale.

Références

- Albrecht, A., Brossard, M., Chotte, J.-L., Feller, C., 1992. Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). Cahiers Orstom. Pédologie. Volume 27, 23–36.
- Allo, M., Todoroff, P., Jameux, M., Stern, M., Paulin, L., Albrecht, A., 2020. Prediction of tropical volcanic soil organic carbon stocks by visible-near- and mid-infrared spectroscopy. CATENA 189, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104452>
- Blanchart, E., Bernoux, M., 2005. Déterminants des stocks de carbone des sols des petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés.
- Sierra, J., Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., Chopin, P., 2015. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. Agriculture, Ecosystems & Environment 213, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015>

Effets des pommiers sur la distribution spatiale et la dynamique temporelle de la matière organique dans un système verger-maraîcher

T. Ramananjatovo^{1,2}, R. Guénon¹, G. Buck-Sorlin², E. Chantoiseau¹, P. Guillermin², M. Delaire² et P. Cannavo¹

¹EPHOR, Institut Agro, SFR 4207 QuaSaV, 49045, Angers, France

²IRHS, INRAE, Institut Agro, Université d'Angers, SFR 4207 QuaSaV, 49071, Beaucazoué, France

Mots-Clés : litières, minéralisation, azote, agroforesterie.

Les chutes de litières figurent parmi les principales sources de matières organiques (MO) dans les systèmes agroforestiers. En se décomposant, elles améliorent les propriétés physico-chimiques et hydriques du sol (Dupraz et Liagre, 2008) et contribuent à l'entretien des activités microbiologiques du sol (Lagerlöf et al., 2014). Les effets des arbres fruitiers sur la dynamique spatio-temporelle de la MO restent peu documentés en systèmes verger-maraîchers, des systèmes innovants de production de fruits et légumes basés sur le principe de l'agroforesterie, malgré leurs multiples intérêts agro-environnementales (Ouma et Jeruto, 2010). Notre étude vise à évaluer les effets des arbres fruitiers sur la distribution spatiale et la dynamique temporelle de la MO et les activités microbiologiques associées dans un verger-maraîcher associant pommier (*Malus × domestica* Borkh) et laitue (*Lactuca sativa* L., var. *Olana* BIO). Elle a été menée sur la parcelle expérimentale de l'Institut Agro - Agrocampus Ouest, à Angers. Nous avons comparé les teneurs en MO et leurs cinétiques de décomposition sur trois planches maraîchères situées à 1.5 m (P1), à 3 m (P2) et à 5 m (P3) d'un rang de pommier de 20 ans d'âge et d'environ 2.5 m de hauteur. Les laitues ont été plantées sur les planches maraîchères de juin à août 2020. Les feuilles sénescentes de pommiers ont été collectées sur chaque planche maraîchère pendant l'automne 2019 en utilisant des filets de récupération, maintenus à environ 30 cm de hauteur. La décomposition des racines de laitues a été suivie après la récolte sur les planches P1 et P3, en plaçant des échantillons de racines entières dans des litterbags de 5mm de maillage (20 cm x 10 cm), enterrés à 15 cm de profondeur. La minéralisation nette de l'azote organique du sol a également été mesurée *in situ* sur chaque planche maraîchère via des dispositifs en tubes cylindriques décrits par Raison et al. (1987). Enfin, les émissions de CO₂ du sol sur chaque planche maraîchère ont été quantifiées à partir d'une chambre de mesure avec analyseur infra-rouge (DX Series, Gasmeter Technologies, Finland). Les apports de litières par les pommiers diminuaient significativement ($p < 0.01$) en s'éloignant du rang (21 g MS.m⁻² sur P1, 8 g MS.m⁻² sur P2 et 2 g MS.m⁻² sur P3) ce qui a favorisé une hétérogénéité des teneurs en MO du sol entre les planches maraîchères ($R^2 = 0.85$). Les teneurs en MO mesurées sur l'horizon de surface (0-30 cm) étaient respectivement de 46, 33 et 30 g.kg⁻¹ de sol sec sur P1, P2 et P3. Les activités microbiologiques du sol étaient plus intenses sur les planches maraîchères se trouvant à proximité des pommiers. Nous avons mesuré une vitesse plus élevée de décomposition des racines de laitues sur P1 par rapport à P3 : sur P1, 50% de la biomasse initiale a été décomposée après deux semaines et 65% au bout d'un mois contre seulement 35% et 48% sur P3. De même, la minéralisation de l'azote organique était significativement différente entre les planches maraîchères ($p < 0.01$) avec une vitesse maximale de minéralisation du NO₃⁻ jusqu'à deux fois plus importante près du rang (2, 1.2, et 1 mgN.kg⁻¹.jour⁻¹ respectivement sur P1, P2 et P3). En revanche, la production de NH₄⁺ était négligeable sur toutes les planches maraîchères. Enfin, dans des conditions similaires d'humidité du sol, les flux de CO₂ présentaient les mêmes variabilités spatiales que pour la minéralisation de l'azote : 6.15 μmole.m⁻².s⁻¹ sur P1, 4.9 μmole.m⁻².s⁻¹ sur P2 et 4.2 μmole.m⁻².s⁻¹ sur P3. Nos résultats suggèrent que les arbres fruitiers contribuent à l'enrichissement en MO du sol et favorisent les activités microbiologiques du sol dans un système verger-maraîcher.

Références

- Dupraz, C., Liagre, F., 2008. *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. France Agricole Editions.
- Lagerlöf, J., Adolfsson, L., Börjesson, G., Ehlers, K., Vinyoles, G.P., Sundh, I., 2014. Land-use intensification and agroforestry in the Kenyan highland: Impacts on soil microbial community composition and functional capacity. *Applied Soil Ecology* 82, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.015>
- Ouma, G., Jeruto, P., 2010. Sustainable horticultural crop production through intercropping: The case of fruits and vegetable crops: A review. *ABJNA* 1, 1098–1105. <https://doi.org/10.5251/abjna.2010.1.5.1098.1105>
- Raison, R.J., Connell, M.J., Khanna, P.K., 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 521–530. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90094-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90094-0)

L'accumulation et la distribution verticale de GRSP (Glomalin-Related Soil Protein) dans les sols forestiers contribuent-elles à la compréhension de son origine ?

^{1,2}Cissé, Gaoussou., ³Kedi Brice., ²Essi, Marc., ⁴Nicolas, Manuel. & ¹Staunton, Siobhan.

Mots-Clés : Glomaline, Carbone organique, Distribution verticale, Sols forestiers, ACE

¹Eco&Sols, INRAE-IRD-Cirad-SupAgro-Univ Montpellier, Montpellier, France

²UFR SSMT, Univ Felix Houphouet Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

³LSTE, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon GUEDE, Daloa, Côte d'Ivoire

⁴ONF, Département Recherche-Développement-Innovation, F-77300 Fontainebleau, France

La matière organique du sol est essentielle pour préserver la qualité des sols, assurer la sécurité alimentaire et atténuer le changement climatique (Lal, 2016). L'étude des mécanismes de séquestration du carbone revêt une grande importance dans un contexte d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique. Une fraction définie de manière opérationnelle de la matière organique du sol (MOS) connue sous le nom de protéine du sol liée à la glomaline (GRSP) est réputée être d'origine fongique (Wright and Upadhyaya, 1999). Elle est aussi censée être très stable et responsable d'une stabilité physique accrue du sol. Cependant, l'origine de cette fraction de MOS et les facteurs contrôlant son accumulation dans les sols ne sont pas bien compris (Jorge-Araújo et al., 2015).

Le but de cette étude était de contribuer à la compréhension de l'origine de cette fraction et des facteurs qui contribuent à son accumulation dans le sol. Cette étude a été réalisée sur des sols archivés de 102 sites du réseau de surveillance à long terme des écosystèmes forestiers en France (RENECOFOR). Ainsi, 495 échantillons de sol ont été collectés sur des profondeurs allant jusqu'à 1 m.

La fraction GRSP a été extraite par autoclavage avec 2 ml de solution de citrate de sodium (20 mM) à pH 7. Les échantillons ont été autoclavés pendant 30 minutes à 121 ° C. Après refroidissement, les surnageants ont été séparés par centrifugation à 15 000 g pendant 10 minutes, suivie d'une seconde centrifugation d'une aliquote de la solution de surnageant pour assurer une séparation complète des phases. La teneur en protéines de l'extrait a été déterminée en utilisant le test de Bradford et la BSA a été utilisée pour l'étalonnage. Les extraits ont été dilués pour obtenir une absorbance à 465 nm d'environ 0,1, comme recommandé par Cissé et al., (2020). La concentration de protéines dans les échantillons dilués a été dosée sur des microplaques en ajoutant 250 µl de réactif Bradford (Bio-Rad Quick-Start™) à 20 µl d'échantillon. Le mélange a été homogénéisé en utilisant un agitateur rotatif pendant 1 min. Les absorbances ont été mesurées à 595 nm en utilisant un lecteur de microplaques ThermoScientific Multiskan GO (Waltham, MA, USA). Les effets du type d'arbre, du climat et des propriétés du sol sur l'accumulation et la distribution verticale de GRSP ont été évalués. La figure 1a et 1b montre les relations entre GRSP, COS et pH pour la couche de surface (0-10 cm). Il existe de fortes relations positives non linéaires entre le GRSP et les contenus COS (figures 1a). Il existe également une relation inverse non linéaire entre le GRSP et le pH, avec une tendance du GRSP à diminuer avec l'augmentation du pH, et des valeurs particulièrement élevées de GRSP dans les sols très acides, pH <4 (Figure 1b). La figure 1c montre l'évolution de la teneur en GRSP en fonction de la profondeur. Cette tendance était similaire au profil d'évolution du carbone organique. L'accumulation de GRSP et l'enrichissement de COS en GRSP, à pH acide, peuvent être une indication de l'origine fongique du GRSP.

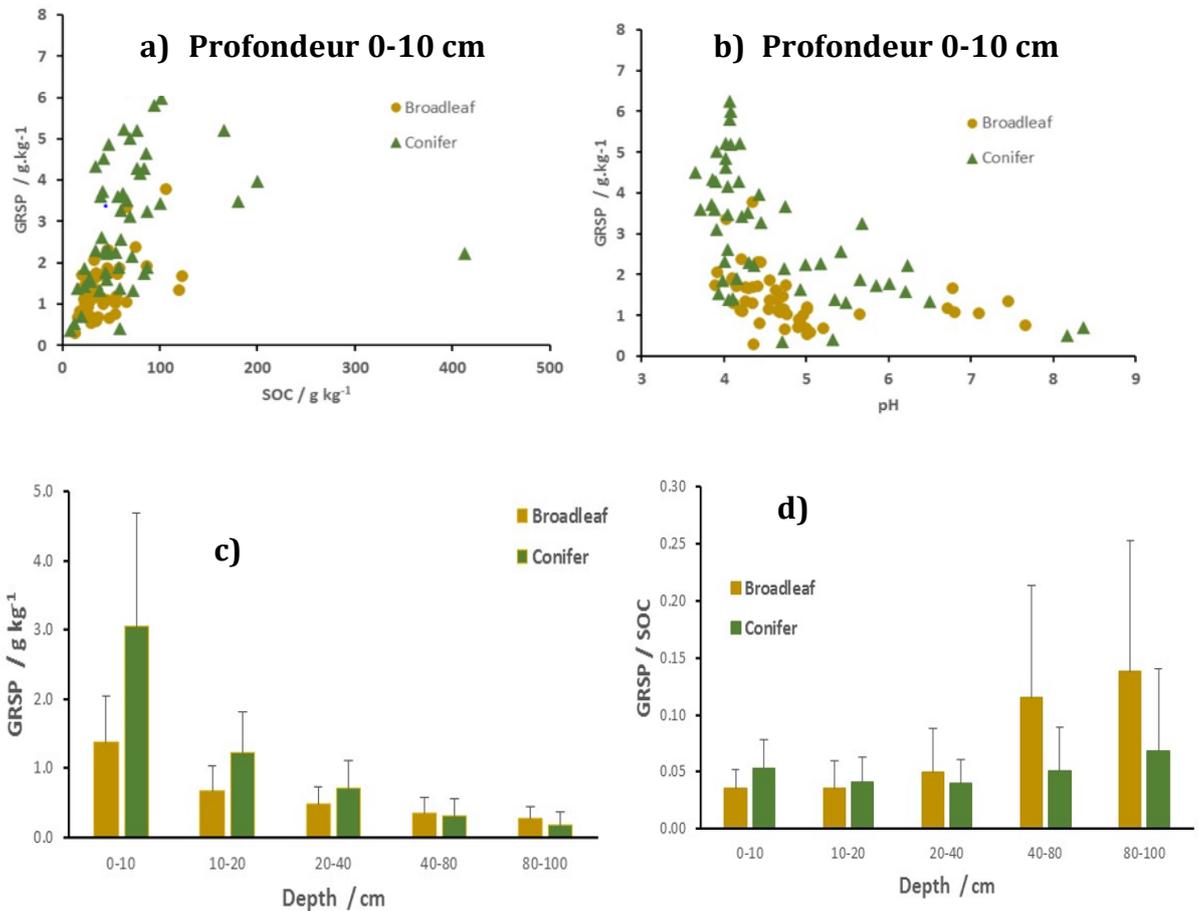


Figure 1 : Accumulation en surface (0-10 cm) et distribution verticale de GRSP

References

- Cissé, G., Essi, M., Nicolas, M., Staunton, S., 2020. Bradford quantification of Glomalin-Related Soil Protein in coloured extracts of forest soils. *Geoderma* 372, 114394. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114394>
- Jorge-Araújo, P., Quiquampoix, H., Matumoto-Pintro, P.T., Staunton, S., 2015. Glomalin-related soil protein in French temperate forest soils: interference in the Bradford assay caused by co-extracted humic substances. *European Journal of Soil Science* 66, 311–319. <https://doi.org/10.1111/ejss.12218>
- Lal, R., 2016. Beyond COP 21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *Journal of Soil and Water Conservation* 71, 20A-25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1999. Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi activity by the glomalin concentration on hyphal traps. *Mycorrhiza* 8, 283–285. <https://doi.org/10.1007/s005720050247>

La distribution et la qualité des racines de blé dur sont modifiées dans un système agroforestier jeune : impact sur le stockage de carbone dans le sol ?

Siegwart Lorène¹, Bertrand Isabelle¹, Jourdan Christophe²

1 - UMR Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

2- CIRAD, UMR Eco&Sols, F-34398 Montpellier, France

Mots-Clés : Stockage de carbone, densité racinaire, traits fonctionnels racinaires, qualités biochimiques racinaires

Introduction

Dans les systèmes agroforestiers, une baisse de rendement de la culture proche de la bande enherbée est observée dans plusieurs études malgré une augmentation de la fertilité du sol (Eastham and Rose 1990). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats, comme la compétition pour la lumière, l'effet des pratiques agricoles (épandage d'engrais, labour...) qui peuvent être altérées près de la ligne d'arbre ou la compétition interspécifique entre la culture et les herbacées présentes sous la ligne d'arbre. L'introduction d'une bande enherbée composée de végétation spontanée ou semée et d'arbres apporte une diversité aérienne et souterraine.

La production de biomasse est l'un des principaux leviers pour augmenter l'apport de carbone au sol et peut entraîner une séquestration de carbone dans le sol sur le long terme. Le rôle des racines dans le stockage de carbone dans le sol est maintenant prouvé et pourtant beaucoup moins étudié que les apports de litières aériennes. De plus, les études sur les racines se limitent souvent à l'horizon superficiel (0-30 cm) correspondant à l'horizon de labour. Pourtant, les racines profondes ont un rôle central dans l'acquisition de nutriments et de l'eau et pourraient jouer un rôle déterminant dans la séquestration de carbone, voir même devenir un critère déterminant pour la sélection végétale.

L'objectif de cette étude est d'identifier l'influence de la ligne d'arbre et de la bande enherbée sur les racines de blé sous l'influence de la bande enherbée (moins de 1.5m) en surface et en profondeur (jusqu'à 1m). L'impact sur le rendement mais aussi sur la compétition en surface et en profondeur est étudié. Enfin, la qualité des racines proche et loin de la bande enherbée et en surface et en profondeur a été déterminé pour appréhender leur traits en relation avec le stockage de carbone dans le sol.

Matériel et méthodes

Le site d'étude est le Dispositif Instrumenté en Agroforesterie Méditerranéenne sous contrainte hydrique (DIAM's) situé au sud de Montpellier (France). Le sol est classé comme Skeletic Rhodic Luvisols avec une très grande teneur en cailloux (jusque 60%), et une accumulation d'argile vers 100 cm de profondeur. Ce site de 5 ha est divisé en trois parcelles répliquées à l'identique. L'agroforesterie est de type 'alley-cropping', constituée d'une association de robiniers (*Robinia pseudoacacia*) et une rotation de cultures annuelles (blé/pois/orge). Une bande enherbée constituée de végétation spontanée et semée complète la ligne arborée avec une largeur de 2 m environ. Les arbres ont été plantés en 2017 avec une densité de 295 arbres /ha. En automne 2019, du blé dur (*Triticum durum Desf*) a été planté, puis récolté en Juin 2020. En mai 2020, au stade floraison du blé, trois fosses ont été ouvertes avec une stratégie d'échantillonnage de 3 positions (bande

enherbée, blé à 1 m de la bande enherbée et blé à 4m de la bande enherbée) et 3 profondeurs (0 – 20 cm, 20 – 50 cm et 50 – 100 cm) (**Figure 1**). Les biomasses aériennes et racinaires ont été mesurées. Quelques racines supplémentaires ont été isolées pour une analyse anatomique et des mesures réalisées sur coupes transversales avec le logiciel ImageJ. Des cubes enfouis dans le profil selon la méthode décrite par Chopart and Siband (1999) ont permis d'étudier les traits fonctionnels sur les racines scannées avec le logiciel WinRHIZO. Une cartographie d'impacts racinaires a été établie aux 3 positions entre 0 et 100 cm de profondeur à l'aide de grilles posées contre les parois des fosses. Les teneurs en carbone, azote et phosphore des racines ont été déterminées, ainsi que les fractions carbonées suivant le protocole Van Soest. Les caractéristiques physico-chimiques des horizons de sol ont également été analysées.

Résultats et discussion

Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont équivalentes sur les 3 positions et varient significativement en fonction de la profondeur. Le sol est plus riche en carbone organique et en nutriments en surface qu'après 20 cm de profondeur. La température du sol ne varie pas selon la distance à l'arbre, mais est sensiblement plus stable sur les horizons profonds par rapport à la profondeur.

Alors que la biomasse aérienne du blé n'est pas modifiée en fonction de la proximité avec la bande enherbée, le blé à 1m a une densité racinaire sur l'ensemble du profil (0-100cm) significativement diminuée par rapport au blé à 4m, et ce surtout en surface. Entre 20 et 100 cm de profondeur, la biomasse est équivalente entre les deux positions de blé. Cela suggère que soit (i) le blé subit un effet de la compétition (pour l'eau ?) et donc a une biomasse racinaire réduite exclusivement en surface, soit (ii) soit le blé sous effet de la compétition a une biomasse racinaire globalement réduite et doit aller explorer de nouveaux horizons, ce qui est discuté car les nutriments ne se trouvent pas en profondeur, soit (iii) le blé sous effet de la compétition a une biomasse racinaire globalement réduite mais la colonisation de la bande enherbée dans les horizons profonds rehausse la biomasse racinaire totale, ce qui ne paraît pas significatif étant donné que les racines trouvées en position blé proche de la bande enherbée correspondaient bien à du blé.

D'un point de vue des traits fonctionnels, la longueur racinaire est également significativement réduite dans le blé proche de la bande enherbée que dans le blé à 4m. La longueur racinaire est liée aux mesures de biomasses puisque le SRL (ratio longueur / masse) ne varie pas selon la proximité à la bande enherbée. En revanche, le SRL augmente avec la profondeur pour toutes les positions de blé, synonyme d'une stratégie d'exploration avec des racines longues et moins épaisses en profondeur car le sol est peu fertile.

L'étude de l'anatomie des racines de blé révèle des différences significatives selon la profondeur. En profondeur, les racines récoltées sont juvéniles avec une structure complète, un rhizoderme entier autour du parenchyme cortical, contrairement aux racines très différenciées en surface. L'épaisseur de l'endoderme tend d'ailleurs à diminuer avec la profondeur, offrant une protection plus importante en surface contre la dessiccation. Pour les racines de blé proche de la bande enherbée, la surface des vaisseaux de métaxylème par rapport à l'aire de la stèle augmente avec la profondeur, ce qui n'est pas le cas pour le blé à 4m de la bande enherbée. Ce résultat peut confirmer notre hypothèse selon laquelle les racines de blé proches de la bande enherbée sont envoyées en profondeur pour capter des nutriments ou de l'eau sous l'effet de la compétition accrue en surface, et développent une anatomie adaptée au prélèvement d'eau.

La biomasse racinaire de la bande enherbée est équivalente à celle du blé à 4m, avec une accumulation de racines en surface. La bande enherbée ne représente a priori pas d'apport significatif de biomasse racinaire supplémentaire par rapport à la biomasse du blé. La teneur en lignine est plus importante pour les racines issues des 3 positions sur les horizons 20 – 50 et 50 – 100 cm par rapport à la surface. Par conséquent, le LCI (ratio lignine / (lignine + hollocellulose))

augmente avec la profondeur et traduit l'augmentation de la récalcitrance de la litière. Sur les racines de surface, la bande enherbée a un LCI plus important que le blé.

Enfin, les horizons de surface se distinguent de la profondeur par les teneurs plus élevées en nutriments et carbone organique du sol, alors la profondeur est liée aux propriétés biophysiques comme la teneur en argile, le pH et la CEC. Les teneurs en carbone et en azote des racines ne semblent pas liées aux caractéristiques du sol, alors que les teneurs en phosphore racinaire et en phosphore disponible du sol évoluent dans la même direction. Ce résultat suggère que les racines investissent le sol pour trouver le phosphore qui est immobile.

Sur ce site agroforestier récent, le stock de carbone organique du sol ne varie pas selon les 3 positions étudiées mais selon la profondeur. Ces stocks observés aujourd'hui sont le résultat d'une succession de cultures annuelles conventionnelles depuis environ 1970 sur ce site. A l'avenir, on peut imaginer que l'hétérogénéité des racines décrite ici va induire une hétérogénéité dans les stocks de carbone. Du fait de leur anatomie, les racines profondes se décomposent plus lentement que les racines de surface. Pour le moment, les racines de la bande enherbée n'apportent pas de biomasse racinaire supplémentaire par rapport à la culture, ce qui est surprenant car les plantes perennes présentent des biomasse racinaire généralement supérieure aux plantes annuelles. En revanche la qualité des racines de la BE est différente avec un LCI en surface plus élevé traduisant une récalcitrance accrue.

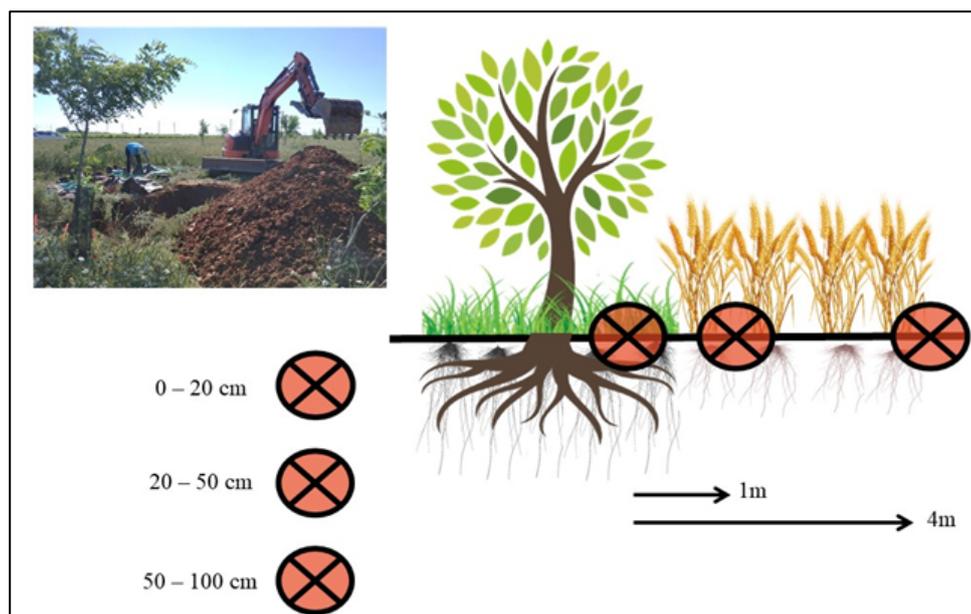


Figure 1 : Plan d'échantillonnage dans chaque fosse : 3 profondeurs (0-20, 20-50 et 50-100 cm) et 3 positions (bande enherbée, blé à 1m et blé à 4m de la bande enherbée).

Variation verticale et horizontale des stocks de carbone organique au long d'une toposéquence au Nord Est de l'Algérie

Bounouara Zohra¹, Tiphaine Chevallier², Didier Blavet², Martial Bernoux², Mahtali Sbih³, Joelle Toucet² et Bensaid Rabah¹

¹ Université de Skikda Algérie, ² UMR Eco et Sol Montpellier France, ³ Université de Batna Algérie.

Mots clés : Toposéquence, matière organique des sols, stockage de carbone, carbone profond, climat méditerranéen.

Le carbone profond du sol (> 30 cm) est le principal réservoir de carbone organique du sol (COS). Cependant, ce carbone n'est pas souvent inclus dans les inventaires de carbone ou les stratégies de gestion en Afrique du Nord. Les informations sur la variation de stock du COS profond par rapport au COS de surface en relation avec la topographie, le type de sol et l'utilisation des terres sont rares, en particulier dans les sols alluviaux d'Algérie.

C'est dans cette optique qu'une toposéquence représentative a été étudiée en milieu méditerranéen non calcaire, à Skikda (Algérie). Les objectifs de cette étude sont (i) de contribuer à une meilleure connaissance des sols d'une toposéquence de la vallée de Zeramna, (ii) de quantifier la teneur en COS et sa distribution verticale le long de la toposéquence, (iii) d'évaluer le stock de COS des horizons de profondeur (>30 cm) en comparaison avec celui des horizons de surface (<30 cm) et (iv) d'évaluer l'effet de la topographie, du type de sol et de son occupation sur le stock de COS dans cette zone méditerranéenne.

Afin de répondre à ces objectifs, quatorze profils de sol ont été réalisés au long d'une toposéquence dans la vallée de Zeramna à El Hadaiek, Skikda (Algérie). Au sommet de la toposéquence, les sols sont occupés par des chênes puis des reboisements d'eucalyptus, par des oliviers dans le piémont et des vergers d'agrumes dans les plaines. Une caractérisation détaillée des sols et la variation de leurs teneurs et stocks en carbone sont étudiés.

Cette étude montre une inversion du gradient des stocks de COS entre les horizons de surface et les horizons de profondeur le long de la toposéquence. En effet pour les horizons de surface (<30 cm), le stock en COS est plus élevé au sommet de la toposéquence que dans la plaine alluviale (65 ± 5 vs 48 ± 1 tC ha⁻¹). Au contraire, pour les horizons de profondeur (>30 cm), le stock de COS est plus élevé dans la plaine alluviale qu'au sommet de la toposéquence (127 ± 3 tC ha⁻¹ vs 105 ± 7 tC ha⁻¹).

Cette inversion de gradient semble liée aux rôles conjugués de plusieurs facteurs associés aux processus d'érosion et de sédimentation, à l'occupation du sol et à la nature des matériaux constitutifs des sols.

Si seuls les horizons de surface sont pris en compte les stocks de COS apparaissent essentiellement régis par l'occupation du sol avec une accumulation de COS essentiellement sous forme de résidus organiques en zone de montagne sous maquis et un plus faible stock de COS dans les sols anthropisés (cultivés ou dénudés) de piémont et de plaine.

Si l'ensemble du premier mètre de sol ou l'ensemble du profil de sol est considéré, les stocks de COS sont bien plus élevés en plaine alluviale, c'est-à-dire dans des Mollisols en arboriculture. 63%, des stocks de COS totaux sont localisés dans les horizons de profondeur (30-100 cm) des

Mollisols alors que seul 48% des stocks de COS sont localisés dans les horizons de profondeur des Inceptisols de la montagne et du piémont. Ces différents types de sol se différencient essentiellement par leur épaisseur et le type de matériau sur lequel ils se développent.

Les processus d'érosion et de colluvionnement ont lieu en montagne et dans le piémont et les processus d'alluvionnement en plaine. En montagne les sols, moins profonds et moins développés qu'en plaine, peuvent être sujets à des pertes de COS par érosion. Ce COS érodé, peut se retrouver enfoui dans la plaine en-dessous des dépôts d'alluvions. Ces dépôts limoneux d'origine fluviale peuvent expliquer en partie ces stocks de COS élevés dont 60% est associés à la fraction limoneuse du sol (Bounouara et al. 2017). De même une relation étroite ($R^2 = 0.25$, $n = 30$, $p = 0.0049^{**}$) est observée entre la teneur en COS et la fraction limoneuse des sols de plaine alluviale, indiquant peut être une origine fluviale du COS des horizons profonds des Mollisols.

Cependant, un plus faible stock de COS est mesuré dans les sols dénudés de la partie supérieure de la plaine alluviale par rapport aux sols sous arboriculture. L'absence d'arbres fruitiers et leur système racinaire profonds des sols dénudés limitent les apports de matières organiques au sol et diminuent les stocks de COS des horizons profonds. Cela suggère un rôle de l'occupation du sol dans le stockage de carbone même dans les horizons profonds. Le stock de COS des horizons profonds est dynamique (Bounouara et al. 2017) et vulnérable au changement d'usage des sols. Il est donc primordial de protéger ces sols et leur végétation afin d'augmenter ou du moins maintenir leurs stocks de COS par des systèmes agricoles dont les apports organiques au sol sont convenables, tel que le développement de l'agroforesterie ou des associations de cultures.

Bounouara, Z., Chevallier, T., Balesdent, J., Toucet, J., Sbih, M., Bernoux, M., Belaisaoui, N., Bouneb, O. and Bensaid, R. 2017. Variation in soil carbon stocks with depth along a toposequence in a sub-humid climate in North Africa (Skikda, Algeria). *Journal of Arid Environments*. 141, 25-33.

Effet des microorganismes de sol sur la séquestration de carbone organique dans différents pédo-paysages de la cuvette Ouargla

Bensayah M.N.H.¹, Karabi M.², Berkal I.¹

¹ Univ Ouargla, Fac. des sciences de la nature et de la vie, Lab. de Recherche sur la Phœniciculture, Ouargla 30 000, Algeria

² Univ Ouargla, Fac. des sciences de la nature et de la vie, Laboratoire de Biogéochimie des Milieux Désertiques, Ouargla 30 000, Algeria

Mots-Clés : séquestration de carbone, carbone organique, carbone microbien, service écosystémique, Ouargla.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des microorganismes sur la séquestration du carbone dans différents pédo-paysages de la cuvette de Ouargla. La région de Ouargla est fait partie les zones arides du Sahara algérien, qui se caractérise par les hautes températures, précipitation faible et irrégulière, une végétation clairsemée et des sols pauvres en matière organique. Cependant, le sol reste un milieu favorable pour les macros et les micros organismes qui tolèrent ce déficit. Le sol rend des services écosystémiques à ces milieux, par la protection des ressources naturelles. La biomasse microbienne qui représente en moyenne 2 à 4% du carbone organique intervient pour le renouvellement de la matière organique dans le sol.

Pour cette étude, on a choisi 7 stations de pédo-séquences différentes. Après le prélèvement, les échantillons ont subi des analyses microbiologiques de dénombrement des bactéries et des champignons, fumigation-extraction, et analyses physico-chimiques.

Le dénombrement des principaux groupes microbiens chez les bactéries et les champignons a montré la prédominance de la microflore bactérienne, suivi par la microflore fongique à des valeurs plus importantes dans le sol cultivé et ceux de Sebkhath. L'identification des espèces fongiques selon les clés de détermination nous ont permis d'identifier les espèces suivantes : *Alternaria alternata*, *Rhizopus sp*, et *Aspergillus Niger*, ainsi que des levures. Les valeurs du carbone microbien montrent que ce paramètre est plus élevé à Sebkhath N'Goussa, sol gypseux de Frane et au niveau de sols cultivés. Ce sont les stations où l'enregistre de fortes valeurs en carbone organique et matière organique. On peut dire que les microorganismes jouent un rôle important dans la séquestration de carbone. Ils minéralisent les résidus microbiens et offrent du carbone à la fraction stable de matière organique de sol.

Les activités microbiennes et les exopolysaccharides influencent la rétention d'eau du sol de deux cultivars de tomate et contribuent à l'adaptation de la plante au manque d'eau

Le Gall S.^{1,5*}, Bérard A.¹, Page D.², Lanoé L.³, Bertin N.⁴, Doussan C.¹

1 INRAE, Avignon Université, EMMAH, F-84000, Avignon, France

2 INRAE, Avignon Université, SQPOV, F-84000, Avignon, France

3 SONITO, F-84000, Avignon, France

4 INRAE, Avignon Université, PSH, F-84000, Avignon, France

5 Adresse actuelle: Agrosphere IBG-3, Forschungszentrum Jülich, Jülich, NRW, Germany

Mots-Clés : Rhizosphère, Déficit en eau, Rétention en eau du sol, Exo-polysaccharides, Activités microbiennes.

D'après la littérature, les processus biologiques dans la rhizosphère jouent un rôle dans l'adaptation des plantes à la sécheresse dans un contexte de changement climatique. Une étude précédente a mis en évidence des différences de productivité et qualité de fruit entre deux cultivars de tomates soumises à un déficit hydrique.

Dans le cadre d'une expérimentation au champ et avec ces deux cultivars testés précédemment, nous avons étudié en quoi l'activité microbiologique et la présence d'exopolysaccharides pourraient améliorer les propriétés hydrophysiques du sol rhizosphérique en condition de déficit hydrique.

Nous avons en effet observé que le sol rhizosphérique présentait des propriétés biochimiques et hydrophysiques distinctes d'un sol moyen. La quantité d'exopolysaccharides, ainsi que l'activité catabolique des microorganismes (champignons en particulier) et leur affinité pour des sources de carbone présentant de l'azote expliquent une partie des résultats de rétention d'eau du sol. De plus, ces mécanismes sont significativement plus développés pour le cultivar, qui présente les meilleures capacités productives en condition de déficit hydrique.

L'humidité du sol et les cycles sec-humides affectent-ils la minéralisation du carbone stocké par les systèmes alternatifs ?

Israel Tchodjowiè Kpemoua^{1,3} ; Sarah Leclerc¹ ; Pierre Barré² ; Sabine Houot¹ ; Valérie Pouteau¹ ; Claire Chenu¹

1- Université Paris–Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR 1402 ECOSYS, 78850 Thiverval-Grignon, France

2- Laboratoire de Géologie de l'ENS, Université PSL, CNRS, UMR 8538, 75005 Paris, France

3- Agence de la Transition Écologique, 20, avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

Mots-Clés : Stockage du carbone, humidité, cycles sec-humides, minéralisation, systèmes alternatifs.

L'agriculture de conservation et l'agriculture biologique sont considérées comme des systèmes alternatifs qui favorisent un stockage additionnel de carbone dans les sols. L'humidité du sol est un facteur environnemental crucial qui affecte la minéralisation du carbone organique du sol (COS). Dans le contexte du changement climatique, on s'attend à ce que le régime hydrique du sol change et que les cycles secs-humides deviennent plus intenses. Ces cycles secs-humides pourraient moduler la communauté microbienne et/ou la perturbation physique des agrégats, augmentant ainsi l'accessibilité de la matière organique précédemment protégée dans ces agrégats après réhumectation. Les pertes de carbone par minéralisation causées par ces cycles sec-humides contribueraient à exacerber l'effet de serre. Il est nécessaire d'évaluer l'impact des cycles secs-humides sur la minéralisation du COS additionnel stocké dans des systèmes de culture alternatifs afin d'anticiper les futures pertes de carbone du sol.

Nous avons évalué ces impacts à travers une expérience d'incubation sur un luvisol tempéré provenant de systèmes d'agriculture de conservation, d'agriculture biologique et d'agriculture conventionnelle à partir d'une seule et unique expérimentation de longue durée.

Les sols ont été incubés à 20°C sur l'horizon 0-30 cm de la couche arable, avec trois traitements à humidité constante (potentiels matriciels pF1.5, pF2.5 et pF4.2) et un traitement avec cinq cycles sec-humides, comprenant sept jours en phase humide (pF1.5) suivis de 10 jours de séchage progressif jusqu'à pF4.2.

La minéralisation du carbone du sol mesurée en continu pendant l'incubation sur 94 jours était plus importante dans les sols à forte humidité (pF1.5 > pF2.5) que dans ceux à faible humidité (pF4.2) dans chaque système de culture. Par rapport aux sols maintenus continuellement humides à pF1.5 ou pF2.5, les cycles sec-humide n'ont pas stimulé la minéralisation du carbone du sol. Néanmoins, des flushes de minéralisation ont été observés après chaque phase de réhumectation, mais ces flushes de minéralisation n'ont pas compensé la faible minéralisation enregistrée dans la phase de séchage par rapport aux sols maintenus à pF1.5 et pF2.5. Toutefois, par rapport aux sols maintenus continuellement à pF4.2, les cycles sec-humides ont stimulé la minéralisation du carbone. Les résultats de la minéralisation spécifique cumulative du carbone, ont montré que le sol sous agriculture biologique a stimulé plus d'émission de carbone du sol en CO₂ par unité de carbone du sol. Cependant, les cinétiques de minéralisation du carbone obtenues sur les cycles secs-humides sont restées similaires pour les trois systèmes de culture, ce qui montre que le COS additionnel stocké dans les systèmes de culture alternatifs présentait une vulnérabilité similaire aux modifications du régime hydrique du sol.

Comment le statut hydrique du sol influence le devenir des matières organiques du sol ? Une revue des processus à des échelles variées.

Charlotte Védère¹, Manhattan Lebrun¹, Nicolas Honvault², Marie-Liesse Aubertin¹, Philippe Biron³, Cyril Girardin¹, Marie-France Dignac³, David Houben², Sabine Houot¹, Cornelia Rumpel³

¹ UMR ECOSYS, INRAE, 78820 Thiverval-Grignon;

² AGHYLE, UniLaSalle, 60026 Beauvais,

³ IEES, UMR 7618, CNRS-UPMC-UPEC-INRA-IRD, Sorbonne University, 75005 Paris,

Mots-Clés : Matières organiques, Séquestration de carbone, eau du sol, humidité du sol, amendements organiques

Le changement climatique en cours impacte les cycles de l'eau et du carbone et leurs interactions avec des conséquences sur la séquestration du carbone sur les terres avec des rétroactions importantes sur les concentrations de CO₂. En effet, les interactions entre les deux cycles déterminent si les sols sont puits ou sources de CO₂, par leur control sur la respiration hétérotrophe, qui représente la moitié des émissions totales de CO₂ des sols. Toutefois le rôle de l'eau du sol dans les processus physiques, chimiques et biologiques contrastés contrôlant ces émissions, est peu connu.

Dans cette étude nous avons effectué une revue de littérature afin d'établir l'état de l'art et les lacunes des connaissances en ce qui concerne les interactions des cycles de carbone et de l'eau et leur rôle dans les processus de stabilisation et de déstabilisation de la matière organique du sol (MOS) ainsi que et leur (retro-)actions sur les fonctions du sol comme le stockage du carbone, la disponibilité des nutriments, le stockage de l'eau, etc. Nous avons fait l'hypothèse, que (1) le changement climatique conduit à des perturbations du cycle hydrologique ce qui pourrait avoir un impact sur le cycle terrestre du carbone par leur effet sur le fonctionnement des plantes et du sol lui-même et que (2) l'eau du sol influence de nombreux processus contrôlant les cycles biogéochimiques et donc les fonctions importantes du sol à différentes l'échelles spatiales d'observation.

Les résultats de nos recherches bibliographiques montrent qu'il y a peu d'études concernent les interactions des deux cycles. Des 16355 articles traitant de la séquestration de carbone dans les sols, seulement 1016 (6%) traitent également de l'humidité du sol. Néanmoins, nous avons pu trouver des travaux mettant en lumière l'importance de l'eau pour le turnover des MOS avec des effets rétroactifs à plusieurs échelles spatiales. Les objectifs de ce travail sont (1) de présenter comment la disponibilité de l'eau impacte la dynamique des MOS et la séquestration du carbone à l'échelle du paysage, du profil de sol via les interactions sol plante et à micro-échelle via son effet sur les micro-organismes du sol, puis (2) de présenter les possibles effets de rétroactions des matières organiques sur l'état hydrique du sol et enfin (3) de discuter comment la gestion des MOS permettront de développer des stratégies d'adaptation au changement climatique.

L'effet de l'eau sur le devenir des matières organiques opère à toutes les échelles considérées en ayant une influence sur les interactions organo-minérale, la stabilité des agrégats ou encore la croissance et l'activité des plantes et des microorganismes du sol. Si les effets de rétroactions directs de la matière organique sur l'eau du sol restent peu clairs des effets indirects sont observés.

Ces effets et leur importance devraient être mieux connus et caractérisés afin d'améliorer les outils de prédictions. L'intérêt de mieux connaître et rendre compte de l'impact des MO sur l'eau du sol permettrait également de mieux gérer les sols et l'eau qu'ils contiennent et retiennent. Les amendements organiques pourraient alors être un levier d'action. Les choix relatifs à leur utilisation dépendent de beaucoup de facteurs et leurs caractéristiques ainsi que les services qu'ils peuvent rendre nécessitent encore d'être étudiés.

Session 4

« Sols d'ici et d'ailleurs :
sols naturels, sols reconstruits »

Archéologie et sols : caractériser les interactions sociétés/milieus chez les Rèmes entre le III^e s. av. et le VI^e s. ap. J.-C.

Marion Dessaint¹

¹ Maison de l'Archéologie et de l'Ethnologie, 21 allée de l'Université, F-92023 Nanterre Cedex

Mots-Clés : archéologie, environnement, pédologie, agronomie, analyse spatiale.

En archéologie rurale, la géographie d'un territoire et les différentes régions naturelles qui le composent sont au cœur des problématiques actuelles sur l'occupation du sol (Van der Leeuw et al. 2003 ; Reddé 2018a). Dans le cadre d'une thèse d'archéologie sur les établissements ruraux du territoire des Rèmes datés entre le III^e s. av. et le VI^e s. ap. J.-C., un inventaire de l'ensemble des opérations archéologiques (récentes et anciennes) a été réalisé. Celui-ci a permis de compiler un peu plus de 3900 occupations principalement situées sur les départements actuels de la Marne, de l'Aisne et des Ardennes (fig. 1).

L'une des problématiques de ce travail est de mieux caractériser les relations entre les populations et leur milieu naturel en s'intéressant à la réciprocité des influences de ces deux éléments l'un sur l'autre. Comment le contexte géomorphologique et pédologique influence-t-il les choix d'implantation des établissements ? Comment les populations utilisent-elles et exploitent-elles leur territoire ? Existe-t-il un lien entre la nature des sols et les choix d'implantation des établissements ? Même si de telles questions sont limitées par des données lacunaires, notamment quand elles concernent la nature des sols aux périodes qui nous intéressent, il est possible d'apporter de nouvelles hypothèses sur la répartition spatiale des établissements par rapport à des critères géomorphologiques et pédologiques bien choisis et définis en amont (Camizuli et al. 2016).

Les données pédologiques réunies dans le cadre du travail du Groupement d'intérêt des Sols (Gis Sol) ont été utilisées, en lien avec les données géomorphologiques, pour définir le contexte environnemental proche d'un établissement rural. Ces contextes environnementaux ont ensuite été classés d'après leur potentialité agronomique pour une mise en culture des sols. Cette typologie permet d'interroger les données archéologiques sur plusieurs points. Tout d'abord, sur l'évolution du territoire sur le temps long : quels sont les types de contextes privilégiés d'une période à l'autre ? Existe-t-il un lien entre la nature de l'occupation et son contexte environnemental ? Dans un second temps, l'utilisation des données sur les restes osseux et végétaux, mis au jour lors d'une fouille, apporte de nouveaux éléments à propos de l'économie agricole et peuvent être mis en parallèle avec les données pédologiques. L'objectif est de comprendre si les sols influencent les productions de ces établissements et comment ces derniers adaptent leurs productions à leur contexte environnemental proche.

Cette communication portera sur la méthodologie utilisée pour définir les types de contextes environnementaux ainsi que sur les premiers résultats de cette analyse croisée de données archéologiques et pédologiques.

Références :

- Camizuli E., Petit C., Bernigaud N., Reddé M., « Principes méthodologiques pour caractériser des agrosystèmes antiques », *Les Nouvelles de l'archéologie*, 142, pp. 20-26.
- Reddé M., *Gallia Rustica 2*. « Les campagnes du nord-est de la Gaule, de la fin de l'âge du Fer à l'Antiquité tardive », Bordeaux : Ausonius Editions, coll. « Mémoire », 50.
- Van der Leeuw S. E., Favory F., Fiches J.-L., *Archéologie et systèmes socio-environnementaux : études multiscales sur la vallée du Rhône dans le programme ARCHAEOEMEDS*, Paris : CNRS Éd, coll. « Monographies / CRA », 27.

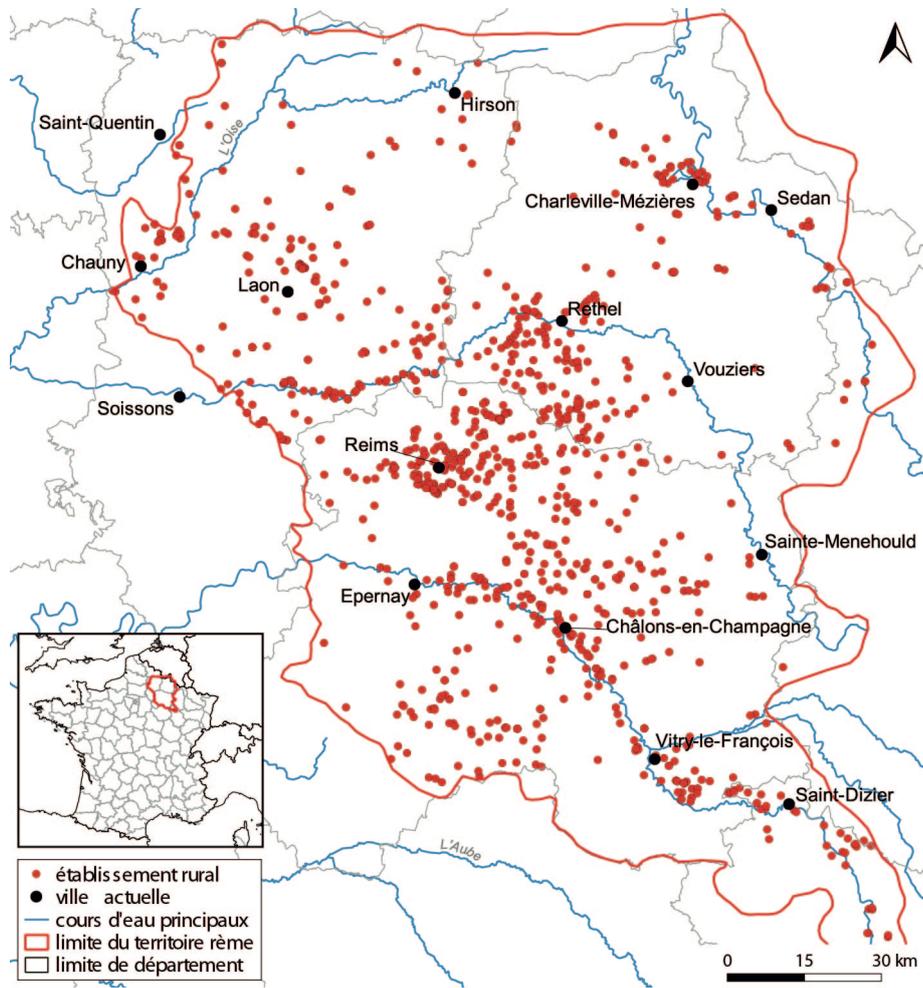


Figure 1. Occupations situées sur les départements actuels de la Marne, de l'Aisne et des Ardennes

« TERNATEC : une réponse opérationnelle pour produire des anthroposols reconstitués en économie circulaire face aux enjeux de la désartificialisation des sols .

Marié X⁽¹⁾ ; Dingkuhn R⁽¹⁾, Maréchal J.⁽¹⁾, Ségur F.⁽²⁾, Harnie-Coussau J.⁽³⁾

⁽¹⁾ SOL PAYSAGE – 8bis Boulevard Dubreuil, 91400 ORSAY.

⁽²⁾ METROPOLE DE LYON – 20 rue du Lac – 69003 LYON

⁽³⁾ SPLA LYON CONFLUENCE - 73 rue Smith - 69002 LYON

Mots-Clés : Désartificialisation des sols, Anthroposols reconstitués ; Economie Circulaire, Friches urbaines, Indicateurs Biologiques.

Hier comme aujourd'hui, mais aussi pour les prochaines décennies, la France connaît un fort besoin de construction de logements notamment dans les grandes métropoles régionales. La conséquence de ce phénomène profond et généralisé sur l'ensemble du territoire est une artificialisation des sols très importante de l'ordre de 15 000 à 30 000 ha par an depuis une quarantaine d'année. Ainsi, en Métropole le modèle économique des « trente glorieuses » a probablement conduit à « consommer » près d'un million d'hectares depuis la seconde guerre mondiale.

La circulaire interministérielle du 29 juillet 2019 prend acte concrètement de ce problème stratégique, en demandant aux Préfets d'appliquer une feuille de route vers le « Zéro Artificialisation Nette » (ZAN). La publication du rapport par France Stratégie recommande, à terme, de réduire de 70% le taux d'artificialisation et de compenser les 30% restant, en désartificialisant 5 500 ha/an d'ici quelques années / décennies. Urbanistes, aménageurs et constructeurs ont reçu cette nouvelle orientation gouvernementale comme un axe de changement important, de nature à remettre en cause leurs pratiques de façon tendancielle et stratégique. L'Association Française d'Etude des Sols (AFES) a décidé de mettre en place un groupe de travail pluridisciplinaire dédié au ZAN. Ce groupe oriente actuellement ses efforts sur la rédaction d'une note scientifique destinée au gouvernement et aux services de l'Etat sur les principales problématiques juridiques, pédologiques et écologiques induites par les questions émergentes que pose l'ambition du Zéro Artificialisation Nette.

Pour limiter l'étalement de la ville sur les espaces agricoles, en prenant appui sur le foncier disponible des friches urbaines en mutation, il s'agit de densifier les centres-villes tout en maintenant, leur attractivité pour leurs futurs habitant(e)s. *Via* leurs aménagements paysagers de proximité, les citoyens souhaitent que leurs lieux de vie réserve une place généreuse à la nature, à ses multiples usages et à ses services écosystémiques.

La préservation de l'agriculture périurbaine a pour corollaire une forte diminution de la disponibilité de matériaux pédologiques de surface, nommés « terre végétales » par les opérateurs de travaux. Dans les grandes métropoles régionales, il devient difficile pour les entreprises d'espaces verts de se fournir en terre végétale. Dès lors, comment alors produire, en ville, les anthroposols reconstitués (cf RP 2008) nécessaires aux plantations d'alignement, aux aménagements paysagers voire à l'agriculture urbaine ?

De nouvelles pratiques d'économie circulaire émergent pour produire des substrats fertiles à partir de terres excavées issues d'horizons pédologiques de sous-face voire de matériaux géologiques sous-jacents.

Parmi les collectivités à fort enjeu sur le thème du ZAN, la Métropole de Lyon fait figure de proue. Pour anticiper le manque de terre végétale dans les prochaines années, la Métropole de Lyon a récemment introduit dans ses cahiers des charges de travaux la prescription de nouveaux

matériaux : les TERres NATurelles issues de l'Economie Circulaire (TERNATEC). La Métropole de Lyon fait ainsi le choix de privilégier la valorisation des excédents de déblais de terres naturelles issues de différentes opportunités de terrassement d'infrastructures linéaires de transport ou bien de bassins de rétention d'eaux pluviales.

La Société Publique Locale d'Aménagement (SPLA) Lyon Confluence a décidé d'accompagner cette évolution en produisant un démonstrateur de cette solution TERNATEC sur son secteur de projet « Le Champ ». En effet, des 2016, un diagnostic agropédologique produit par le Bureau d'Etude Sol Paysage concluait à l'absence totale de ressources pédologiques naturelles sur l'emprise projet du secteur « Champ Confluence », notamment du fait des remblaiements de Technosols industriels sur plusieurs mètres d'épaisseur, du port fluvial historique qui préexistait au XIX^{ième} siècle.

En 2018, les travaux de préfiguration du futur quartier ont permis de produire un démonstrateur d'un demi-hectare d'anthroposols reconstitués urbains à partir d'un ressource de 3500 m³ de mètres cubes de limons sableux excavés entre environ -50 cm et - 100cm issus d'un chantier sur la commune de Francheville. La partie superficielle du sol reconstitués à partir des limons de Francheville a fait l'objet d'un apport de 10 à 12 cm d'épaisseur de compost de déchets verts recyclés, produits sur le territoire de Métropole. Le compost a été mélangé sur les 25 premiers centimètres de limon afin de reconstituer l'horizon superficiel de l'anthroposol. La surface a été engazonnée et de premières plantations d'arbres effectuées.

En 2019, de nouvelles plantation d'arbres ont été réalisée, parallèlement à la réalisation d'un autre chantier de plantation situé à toute proximité, cette fois avec la solution classique, à savoir un anthroposol reconstitué à partir de terre végétale issue du décapage de sols agricole périurbain. Ce chantier nommé « FrenchTech » constitue donc le témoin du démonstrateur TERNATEC.

Depuis l'origine, les deux chantiers font l'objet d'un suivi agropédologique de leur évolution : description de profils, analyse physicochimique, enracinement des arbres, indicateurs biologiques : biomasse microbienne, populations de nématodes, populations lombriciennes.

Construire des sols fertiles à partir de déchets urbains : interactions entre la matière organique et les vers de terre

J. Araujo^{1,2}, A. Pando¹, C. Hartmann¹, H. Aroui¹, T. Desjardins¹, T.Z. Lerch¹

¹ Institute of Ecology and Environmental Sciences (SU, CNRS, UPEC, IRD, INRAe, Univ. de Paris), 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

² Est-Ensemble, 100 Avenue Gaston Roussel, 93230 Romainville, France, France

Mots-Clés : Technosols construits ; Compost ; Vers de terre ; Agriculture urbaine

L'agriculture urbaine (AU) se développe sous une multitude de formats adaptés aux différents contextes urbains. Cette activité souvent pratiquée à petite échelle joue un rôle important dans l'amélioration du cadre de vie des citoyens. Les espaces urbains dédiés à l'AU sont ainsi multifonctionnelles et depuis plusieurs années ils sont progressivement intégrés aux nouveaux projets d'aménagements urbains.

Cependant, la réappropriation de la ville pour développer de l'agriculture est limitée par la mauvaise qualité des sols urbains ainsi que la présence très fréquente de contaminations (Foti et al., 2017) qui peuvent poser de risques aux utilisateurs. Ainsi, l'expansion de l'AU dépend de l'apport de sols fertiles le plus souvent issus de sols ruraux. Une alternative pour réduire cette empreinte environnementale est le recyclage de déchets urbains issus de la construction pour créer des Technosols. Les nouvelles politiques environnementales encouragent les collectivités à développer cette économie circulaire dans la création de nouveaux espaces verts.

En Ile-de-France, les terres excavées du Grand Paris représentent plus de 10 millions de tonnes par an. Un paramètre clé pour valoriser ces terres dites « stériles » en agriculture réside dans l'incorporation de matière organique pour améliorer ses qualités agronomiques. Les aménageurs ont notamment accès à des déchets organiques générés en grande quantité dans les villes : le compost de déchets verts. Le compost allège la terre excavée en augmentant sa porosité et représente un riche apport en matière organique qui est le facteur majeur du cycle des nutriments.

En conséquence, le compost est capable d'améliorer la capacité des sols de stocker d'eau et soutenir la croissance de plantes, surtout en combinaison avec la macrofaune du sol (Deeb 2015, 2016). Néanmoins, peu de choses est connu sur le comportement de ces mélanges en nature et sur leur potentiel pour développer de l'agriculture urbaine.

L'objectif de notre étude est de tester *in situ* l'effet d'un apport croissant de compost en interaction avec de vers de terre sur la croissance de jeunes pousses de salades en mono et co-culture. Les traitements comprennent 3 compositions de Technosols avec 10%, 20% et 30% de compost en présence et absence de vers de terre. Quatre différents semis de salades ont été testés : monocultures de laitue, épinard et roquette, et la co-culture des trois. L'étude s'est déroulée dans le campus de l'IRD à Bondy de mai à octobre de 2017, en utilisant 96 bacs de jardinage de 50L. Les résultats de l'expérience sont basés sur l'analyse des sols et sur la production de 3 récoltes consécutives, une par saison : printemps, été, automne. Chaque récolte a été réalisée après 5 semaines de croissance.

Globalement, l'augmentation de compost a amélioré la productivité des substrats mais les effets les plus notables ont été observés sur la production des salades poussant avec 30% de compost en présence de vers de terre. Les effets sont exprimés différemment selon les cultivars et les saisons. La roquette est le cultivar le mieux adapté à ces nouveaux substrats étant celui qui a mieux répondu à l'augmentation de compost et à la présence de vers de terre. L'automne était la saison avec le moins de variabilité, et la période où tous les cultivars ont été plus performants en présence de vers de terre dans les substrats avec 30% de compost.

L'impact du compost a été observé sur la macroporosité des Technosols. Les vers de terre eux, ont impacté la microporosité des substrats et ont aussi contribué à une baisse de leur pH, suggérant une activité biologique plus forte. Ces résultats montrent que le potentiel agronomique des terres d'excavations peut être modulé selon la quantité de compost vert et l'activité de vers de terre. La dynamique du carbone dans les Technosols semble être dépendante de l'interaction entre ces deux facteurs.

Les assemblages des matières organiques et minérales comme pratiques innovantes de restauration de la fertilité des sols

Manoa Raminoarison¹, Eric Blanchart², Tantely Razafimbelo¹, Koloina Rahajaharilaza¹, Benoît Jaillard², Jean Trap²

¹Laboratoire des Radio Isotopes, BP 3383, Route d'Andraisoro, Antananarivo 101, Madagascar

²Eco&Sols, Univ Montpellier, IRD, INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

Mots-Clés : riz pluvial, fertilité des sols, analyse combinatoire, Ferralsols.

Introduction

L'expansion des surfaces aménageables sur les zones de colline ou '*tanety*' des Hautes Terres de Madagascar, pour la production de la riziculture pluviale, a pris une grande ampleur. Cette conversion du changement d'usage pourrait constituer un levier pour atteindre la sécurité alimentaire du pays. La production de riz pluvial y reste néanmoins très faible. La faible fertilité des sols de '*tanety*', l'accessibilité limitée des producteurs aux intrants ainsi que le mode de production et de gestion des terres expliquent ce faible rendement. Les sols sont classés en tant que Ferralsols, caractérisés par une acidité élevée, une teneur en aluminium toxique également importante, une teneur en matière organique relativement faible ainsi qu'une capacité d'échange cationique très faible. L'assemblage des matières fertilisantes (MF) organiques et/ou minérales apparaît comme une alternative pour améliorer la fertilité des agrosystèmes à bas intrants et à carences multiples.

La conception d'une combinaison de MF performante nécessite une typologie appropriée afin de bénéficier des interactions de complémentarité entre les MF. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'identifier les assemblages de MF qui améliorent la croissance et la nutrition des plantes et qui assurent la fertilité à long terme des sols. Pour cela, une approche *a posteriori* à partir d'un modèle combinatoire a été adoptée pour cette étude puisqu'elle tient compte des interactions réellement générées entre les matières au sein d'un assemblage.

Matériels et méthodes

Echantillonnage des sols.

Un échantillon de sol a été collecté sur la couche superficielle (0-20 cm) d'une parcelle agricole provenant de la Région Itasy, près de la localité d'Imerintsiatosika (19° 05' 40''S; 47° 25' 65'' E; 1480 m d'altitude). Le sol est caractérisé par un pH acide (<5), et présente des multiples carences notamment en phosphore, en azote, en calcium et en magnésium (Raminoarison *et al.*, 2020).

Collecte des matières fertilisantes organiques et minérales et doses d'apport.

Dix-sept produits organiques et/ou minéraux ont été testés. Ils ont été obtenus auprès des agriculteurs de la Région Vakinankaratra et de la Région Itasy, et des commerçants et associations locaux.

Description de l'expérience.

L'analyse combinatoire consiste à sélectionner plusieurs assemblages de matières pour pouvoir les séparer dans des groupes homogènes selon leurs réponses sur un paramètre donné. 147 assemblages, où chaque assemblage est un mélange aléatoire de trois MF parmi les 17 matières collectées, ont été retenus et préparés.

La dose d'apport des matières varie selon l'appréciation des agriculteurs à utiliser les matières sélectionnées. Neuf matières fertilisantes s'appliquent en tant qu'amendement organique, et huit en

tant qu'engrais. Ainsi, 6 t MS ha⁻¹ et 500 kg MS ha⁻¹ pour les amendements organiques et les engrais, respectivement, ont été appliquées, quels que soient les assemblages.

Des pots cylindriques pouvant contenir 5 kg de sol sec ont été utilisés pour l'installation de l'expérience. Ce sol est ensuite mélangé avec les assemblages. Chaque pot correspondait ainsi à un assemblage. Puis, trois graines de riz (variété Chhomrong Dhan) ont été semées dans chaque pot. Au cours de l'étude, l'humidité du sol a été gardée à 70% de la capacité au champ. L'expérience a duré 60 jours et a été effectuée en milieu contrôlé sous serre.

Variables mesurées

A la fin de l'expérience, la réponse des assemblages a été appréciée à partir d'un indice multicritère total qui renseigne sur (i) la croissance des plantes, (ii) la nutrition des plantes et (iii) les indicateurs de la fertilité des sols.

Analyse combinatoire

La typologie *a posteriori* des MF est basée sur les réponses des assemblages aléatoires de matières à travers l'utilisation d'un modèle combinatoire (Jaillard *et al.*, 2018). Dans l'ensemble, la procédure construit un arbre hiérarchique de classification des MF en groupe qui optimise au mieux l'explication des réponses observées. Dans un premier temps, le modèle regroupe les matières dans des groupes fonctionnels ; donc, chaque assemblage est considéré comme une combinaison de groupes dont chaque combinaison de groupes est désignée sous le terme de motif d'assemblage. Dans un second temps, les assemblages testés peuvent ainsi être regroupés par motif d'assemblage, c'est-à-dire que le modèle rassemble tous les assemblages qui appartiennent au même motif d'assemblage. Les valeurs prédites du modèle correspondent donc à la moyenne des performances d'un groupe des assemblages qui partage le même motif d'assemblage. Les valeurs prédites sont ensuite confrontées aux valeurs observées et le modèle utilise le coefficient de détermination R^2 comme critère de classification.

Le processus itératif est répété en déplaçant les composants d'un groupe à un autre de manière à optimiser le coefficient de détermination R^2 . L'objectif est d'obtenir un R^2 optimal pour que la variance des performances des assemblages appartenant au même motif d'assemblage soit faible. Pour tester l'efficacité de prédiction du modèle, la même approche itérative est utilisée par cross-validation. Le nombre optimal de groupes résulte d'un compromis entre la précision (R^2) et l'efficacité (E) du modèle.

Résultats et discussion

A l'issue du modèle, les 17 MF ont été classées en cinq groupes (Figure 1). La {Corne de zébu} seule appartient au groupe 'a', et son association avec les autres groupes de MF induit les meilleurs motifs d'assemblages (abd, acd, abe). La présence notable de kératine peut expliquer la particularité de cette matière. La {Corne de zébu} peut assurer la libération lente d'azote minéral qui restait disponible tout au long de la croissance du riz. Cette matière se distingue également des autres matières par sa forte teneur en carbone et en soufre.

La présence d'une MF du groupe 'b' {Fumier provenant d'Itasy, Fientes de chauve-souris, Compost par Madacompost, Taroka, Lombricompost venant de Vakinankaratra} et du groupe 'd' {Cendre d'*Eucalyptus*, Fumier venant de Vakinankaratra} comblent les autres carences notamment en phosphore, calcium et magnésium. L'effet positif de la {Fiente de chauve-souris}, {Taroka} et {Cendre d'*Eucalyptus*} sur la disponibilité en P a été prouvé ; de plus, la {Cendre d'*Eucalyptus*} a la capacité de fournir suffisamment de calcium et de magnésium pour la plante. Par ailleurs, le groupe 'e' se caractérise principalement par des matières capables de fournir aux plantes de nutriments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium) immédiatement biodisponibles. Grâce à une typologie *a posteriori* des MF, un panel de choix existe dans un groupe de matières qui constitue un motif d'assemblages.

Ainsi, les agriculteurs peuvent à leur tour composer des assemblages appartenant à des motifs plus performants en tenant compte de leurs contraintes agronomiques et socio-économiques pour améliorer la fertilité de leurs sols.

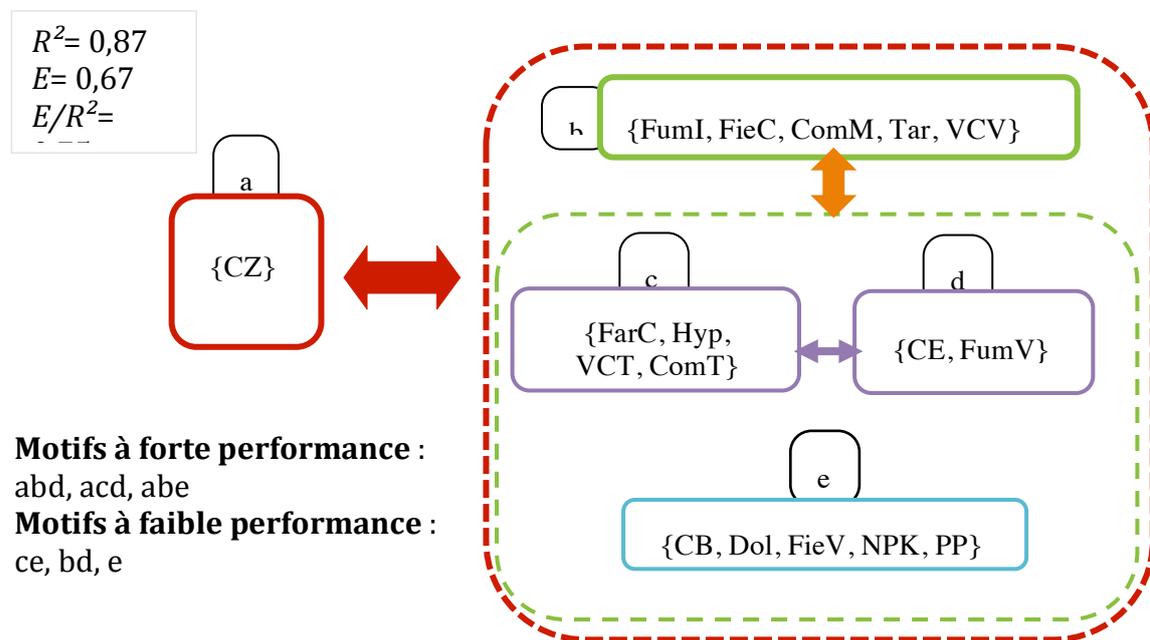


Figure 1 : Typologie par approche combinatoire des matières fertilisantes organiques et/ou minérales sur l'indice multicritère.

a, b, c, d, e : groupes fonctionnels

CB : Cendre de balle de riz, **CE** : Cendre d'Eucalyptus // **VCV** : Lombricomposts de matières végétales et animales provenant d'un producteur de Vakinankaratra, **VCT** : Lombricomposts de matières végétales et animales produit par l'association TATA, **Tar** : Compost de matières végétales et animales connus commercialement sous le nom de Taroka, // **ComT** : Composts fermentescibles alimentaires et /ou issus des produits ménagers de la décharge d'Andralanitra, **ComM** : Composts fermentescibles alimentaires et /ou issus des produits ménagers de la décharge de Mahajanga // **FumI** : Fumier provenant d'un producteur de la Région d'Itasy, **FumV** : Fumier provenant d'un producteur de la Région de Vakinankaratra // **PP** : Déjections animales sans litières (poudrette de parc) // **FieC** : Fientes de chauve-souris, **FieV** : Fientes de volailles // **CZ** : Corne de zébu broyée // **FarC** : Farine de crustacés // **Dol** : Dolomie // **Hyp** : Mélange de roche apatitique micronisée et de sol noir volcanique (Hyperfos) // **NPK** : Engrais de synthèse.

Références

- Jaillard, B., Richon, C., Deleporte, P., Loreau, M., Violle, C., 2018. An a posteriori species clustering for quantifying the effects of species interactions on ecosystem functioning. *Methods in Ecology and Evolution* 9, 704–715.
- Raminoarison, M., Razafimbelo, T., Rakotoson, T., Becquer, T., Blanchart, E., Trap, J., 2020. Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in ferralsols: a greenhouse nutrient-omission trial. *Journal of Plant Nutrition* 43, 270–284.

Effet de l'amendement organique d'un bassin de décantation cupro-zincifère sur les caractéristiques physico-chimiques des horizons et le développement racinaire des végétaux ligneux 14 ans après plantation.

Jacques Kilela Mwanasomwe, Mylor Ngoy Shutcha & Gilles Colinet

jacqueskilela@gmail.com, gilles.colinet@uliege.be

Mots-Clés : bassin de décantation, éléments traces, amendement, espèces ligneuses, phytostabilisation

Parmi les déchets de l'activité minière, les bassins de décantation et remblais sont connus pour avoir l'impact environnemental le plus important, car ils présentent des teneurs usuellement élevées d'éléments traces et sont sensibles à la dispersion par le vent et l'érosion hydrique. Une plantation d'espèces ligneuses aidée par des amendements organiques a été installée dans le bassin cupro-zincifère de Katapula/Kipushi, RD Congo dans le cadre d'essais de végétalisation du site. Notre étude a comme objectif d'évaluer les caractéristiques physico-chimiques (teneur en COT, pH, concentrations en ETM et macroéléments disponibles) dans des couches amendées et non amendées ainsi que d'évaluer la densité de racines des ligneux 14 ans après plantation (Photo 1). Les résultats ont montré que la couche non amendée avait un pH et une teneur en Ca et Mg plus élevés que la couche amendée ; en revanche celle-ci était plus riche en COT, P et K. Les deux couches (amendée et non amendée) ont présenté la même teneur en Cu, Co et Cr, alors que la concentration en Zn, Cd, Pb, Ni, As était plus élevée dans la couche du bassin en comparaison à la couche amendée. Les densités de racines des ligneux (taille, abondance et distribution) étaient plus importantes dans la couche amendée, toutefois certaines espèces ligneuses (*Acacia polyacantha*, *Cupressus Lusitanica*, *Albizia lebbek*, *Senna siamea* et *Leucaena leucocephala*) ont pu développer une biomasse aérienne importante et quelques grosses racines dans la couche non amendée répondant ainsi aux critères de sélection des espèces ligneuses à utiliser pour la phytostabilisation de sites fortement contaminés.

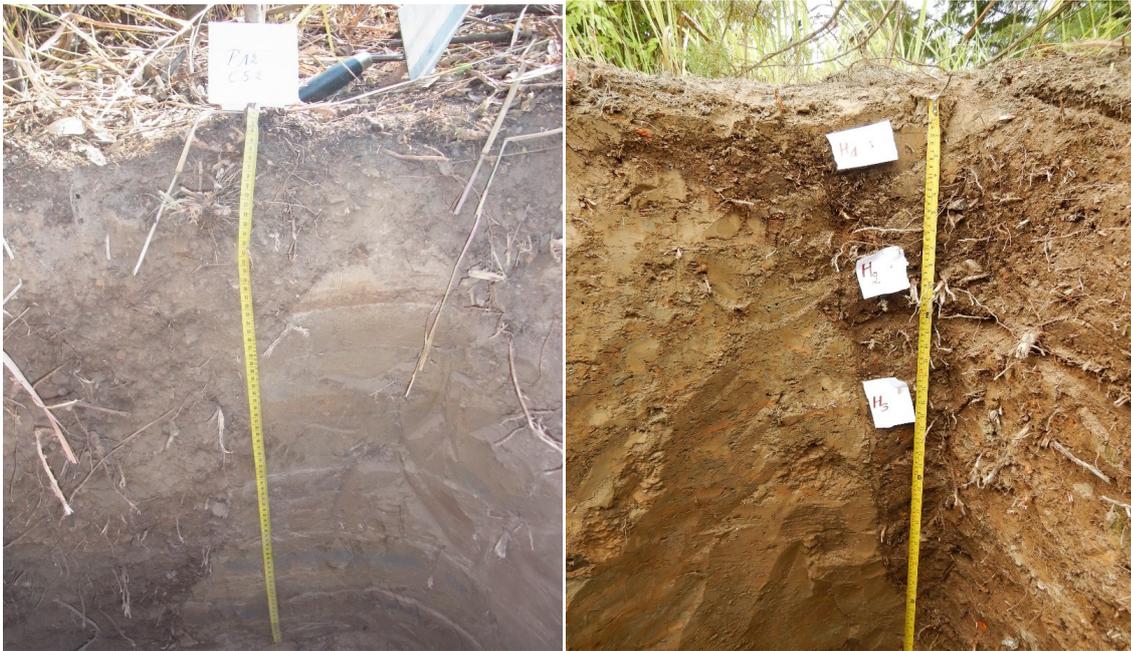


Photo 1. Profils pédologiques au côté des arbres du bassin de décantation de Katapula/Kipushi
(couche amendée : densément enracinée et couche non amendée avec densité des racines faible)

Les choix méthodologiques influencent-ils les résultats ? Application aux essais de lixiviation en colonne de sol

Pirlot Clémence¹, De Clerck Caroline¹, Pigeon Olivier², Degré Aurore¹

¹ Uliège, Gembloux Agro-Bio Tech, 2, Passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique – clemence.pirlot@uliege.be

² CRA-W (Centre wallon de Recherches Agronomiques), 4, rue du Bordia, 5030 Gembloux, Belgique – o.pigeon@cra.wallonie.be

Mots-Clés : Colonne de sol, lixiviation, pollution, pesticides, CaCl₂

L'intensification de l'agriculture avec l'utilisation importante de pesticides a eu des répercussions néfastes sur l'environnement avec des pollutions au niveau des sols, de l'air et des masses d'eau. A ce jour, l'agriculture est devenue une des pressions majeures qui pèsent sur la qualité des eaux. En effet, une grande partie des pesticides appliquée au sol n'atteint pas sa cible et est volatilisée, adsorbée, dégradée en métabolites ou lixiviée à travers le profil de sol. Pour cette raison, la recherche scientifique sur le devenir de ces composés dans l'environnement s'est grandement développée. En effet, les connaissances en terme du transfert de pesticides au sein d'un profil de sol sont encore très limitées. Or, une meilleure compréhension du devenir de ces derniers est indispensable afin d'en améliorer la gestion et d'assurer la protection de l'environnement.

Afin d'étudier le devenir des pesticides au sein d'un profil de sol, plusieurs types d'expériences sont retrouvés dans la littérature. Les expériences les plus proches de la réalité sont les longues expériences de terrain avec l'application de pesticides aux sols agricoles. Cependant, ces expériences sont généralement très onéreuses et ne peuvent être réalisées partout. Il est alors utile d'acquérir des informations grâce à des expériences en laboratoire.

Les expériences en laboratoire sont généralement des expériences en batch, de chromatographie en couche mince ou en colonne de sol. Afin d'obtenir des informations pertinentes sur la mobilité potentielle des pesticides dans les sols et de bien simuler les flux d'eau, les expériences en colonnes de sol sont massivement rencontrées dans la littérature (USEPA, 2008). Elles permettent de comparer la mobilité des pesticides entre eux ainsi que d'étudier leurs comportements de lixiviation dans différents sols. Les expériences en colonne servent également à analyser les mécanismes qui sous-tendent les mouvements de ces pesticides en colonne (Katagi, 2013). La courbe d'élution des pesticides ainsi que la distribution des pesticides adsorbés au sein de la colonne peuvent alors être étudiées et permettent d'obtenir les paramètres de sorption et de dégradation des pesticides.

Cependant, au sein de la littérature traitant des expériences de lixiviation en colonne de sol, les modalités des colonnes utilisées sont très variables, empêchant les résultats obtenus d'être comparés ou transposés à d'autres cas. Une première modalité variant fortement dans la littérature est la structure du sol mise dans les colonnes. Les expériences de mobilité des pesticides sont généralement réalisées avec du sol remanié, à savoir préalablement séché, tamisé puis tassé uniformément dans la colonne. Ces colonnes remaniées ont l'avantage d'être plus reproductibles que des colonnes non remaniées (Isensee et al., 1992). Les colonnes de sol non perturbées, prélevées directement sur le terrain, offrent quant à elles l'avantage de se rapprocher des conditions réelles et d'investiguer les flux préférentiels, l'effet de l'amendement, du travail du sol ou encore des cultures. Une deuxième modalité très variable est la taille de la colonne. Le diamètre de la colonne ainsi que la longueur de cette dernière varient fortement d'une expérience à l'autre sans justifications.

Ainsi, l'objectif de cette étude est d'analyser l'impact des choix méthodologiques sur le comportement de lixiviation au sein d'une colonne de sol. Cette recherche vise à comparer l'effet

de la structure du sol, du diamètre et de la hauteur des colonnes sur le comportement de lixiviation d'un soluté au sein d'une colonne de sol.

Un pulse de CaCl_2 a été appliqué à 15 colonnes de sol limoneux agricole prélevé à Gembloux. Des colonnes de sol remanié et non remanié, de 8,4 et de 24 cm de diamètre ainsi que de 20 et de 35 cm de hauteur ont été réalisées. Une hauteur d'eau de 2,21 cm a été appliquée régulièrement à la surface des colonnes. Le pH, la conductivité électrique et le volume de l'eau percolée ont été mesurés.

Les résultats montrent une grande influence de la structure du sol sur la lixiviation du CaCl_2 . La courbe d'élution des colonnes remaniées montre un pic plus haut et plus fin que la courbe d'élution des colonnes non remaniées (figure 1). Le CaCl_2 est rapidement lixivié des colonnes remaniées avec 65,9% de la masse de CaCl_2 qui ressort après 10 cm d'eau percolé alors qu'il est plus longtemps retenu dans les colonnes en structure conservée où seulement 47,7% ressort après 10 cm d'eau percolé. De plus, après 16 cm d'eau percolé, 100% du CaCl_2 est lixivié à travers la colonne contre 80,1 % pour les colonnes non remaniées. De plus, l'avantage des colonnes remaniées mis en avant dans la littérature est la plus grande reproductivité de ces colonnes. Or, les écarts-types des colonnes non remaniées sont en moyenne plus faible que les écarts-types des colonnes remaniées (40,5 mg L^{-1} pour les colonnes non remaniées contre 67,8 mg L^{-1} pour les colonnes remaniées).

Le diamètre de la colonne a une influence moindre sur la lixiviation des solutés. La courbe d'élution des colonnes de 24 cm de diamètre et des colonnes de 8,4 cm de diamètre se suivent globalement (figure 1). Cependant, un plus grand effet de dispersion est observé dans les colonnes de 24 cm de diamètre avec un pic légèrement plus aplati et plus large. Ainsi, après 12 cm d'eau percolé, 91,5% de CaCl_2 est ressorti pour les colonnes de 8,4 cm de diamètre contre 84,4% pour les colonnes de 24 cm de diamètre.

La variation de la hauteur de la colonne de sol n'a pas une grande influence sur la courbe d'élution du CaCl_2 excepté au niveau du pic, plus important pour les colonnes de 20 cm. En effet, le CaCl_2 sort plus rapidement des colonnes de 20 cm que des colonnes de 35 cm. Après 10 cm d'eau percolé, 69,2 % du CaCl_2 est ressorti des colonnes de 20 cm de haut contre 63,7% pour les colonnes de 35 cm de haut. La hauteur de la colonne de sol ainsi qu'une potentielle semelle de labour dans les colonnes de 35 cm pourraient également expliquer ces résultats. Afin de déterminer la dispersion du CaCl_2 au sein des colonnes et l'influence de la semelle de labour, une modélisation des colonnes sur le logiciel Hydrus sera nécessaire.

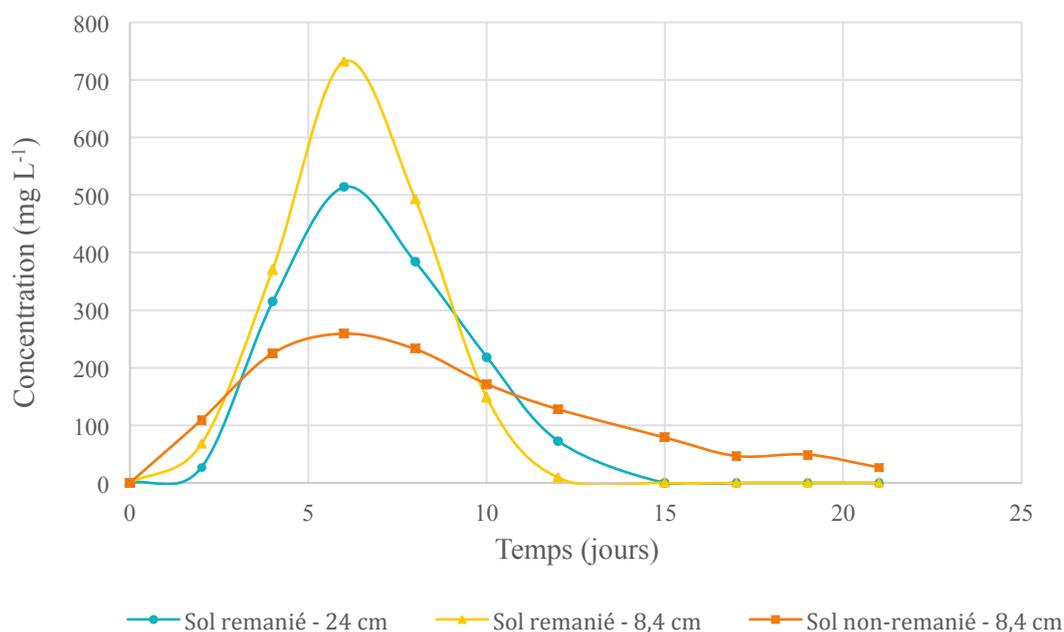


Figure 3. Courbes d'élution du CaCl_2 pour les colonnes remaniées de 24 cm et de 8,4 cm de diamètre et les colonnes non remaniées de 8,4 cm de diamètre.

Références

- Isensee A.R. & Sadeghi A.M., 1992. Laboratory apparatus for studying pesticide leaching in intact soil cores. *Chemosphere* **25**(4), 581–590.
- Katagi T., 2013. Soil Column Leaching of Pesticides. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* **221**, 1–105.
- USEPA, 2008. Fate, transport and transformation test guidelines. OPPTS 835.1240 Leaching Studies, Prevention, Pesticides And Toxic Substances (7101), Washington DC, 14.

Adsorption et désorption des formes organiques de phosphore par les oxyhydroxydes de Fe/Al, les minéraux argileux et les substances humiques.

Issifou Amadou¹, Michel-Pierre Faucon¹, David Houben¹

¹AGHYLE (SFR Condorcet FR CNRS 3417), UniLaSalle, 19 Rue Pierre Waguet, 60026 Beauvais, France

Mots-Clés : P organique ; déchets organiques ; adsorption, désorption

L'application de phosphore (P) au sol étant nécessaire pour maintenir ou améliorer le rendement des cultures, l'épuisement des réserves mondiales de roches phosphatées à partir desquelles sont produits les fertilisants conventionnels met aujourd'hui en péril la sécurité alimentaire. Par conséquent, le recyclage du P provenant des Matières fertilisantes d'origine organiques (Mafor) devient une nécessité pour assurer une gestion durable du phosphore au sein des agroécosystèmes. Toutefois, le P contenu dans les Mafor se présente sous diverses formes inorganiques et organiques qui diffèrent dans leur disponibilité pour les plantes. La plupart des recherches sur le devenir du P appliqué au sol se sont concentrées sur le Pi, montrant que la majeure partie de celui-ci est adsorbée à la surface du sol, ce qui, à son tour, influence sa disponibilité pour les plantes. En revanche, le devenir des formes organiques de P (OP) a été peu étudié jusqu'à présent et on manque encore de connaissances sur la contribution de ces formes à la nutrition des plantes. Les principales formes de composés Po dans les Mafor sont notamment le myo-inositol hexakisphosphate (IHP), le glycérophosphate (GLY) et le glucose-6-phosphate (G6P). Chaque forme diffère des autres par sa teneur en P, le type de liaison P et la taille de la molécule. Ces propriétés biochimiques sont susceptibles d'impacter leur disponibilité pour les plantes car elles gouvernent leurs interactions avec les phases solides et donc potentiellement les phénomènes d'adsorption et de désorption avec les principaux composants du sol.

Dans cette étude, nous examinons l'adsorption et la désorption des trois formes majeures de OP présentes dans les Mafor (IHP, GLY et G6P) et une forme IP sur les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (goethite et gibbsite), les minéraux argileux (kaolinite et montmorillonite) et les substances humiques (acide humique) afin de mieux contraindre les processus contrôlant la disponibilité des formes de P organiques dans le système sol-plante.

Les résultats de cette étude soulignent plusieurs processus qui sont importants pour comprendre l'absorption et la libération du P et finalement sa disponibilité dans le système sol-plante. La forme myo-IHP s'avère être la forme de P qui est fortement adsorbée et GLY la forme la moins adsorbée. La forme IP présente une adsorption plus élevée que GLY et G6P. L'enrichissement du myo-IHP dans la plupart des sols peut être le résultat de sa plus grande quantité adsorbée et de sa plus faible vitesse de désorption minérale comme indiqué dans cet article. Puisque le myo-IHP à lui seul équivaldrait à 65% du P annuel total appliqué comme engrais, des approches innovantes doivent être développées pour améliorer sa mobilisation par les plantes. Soit en liant les traits des plantes, soit en stimulant les microorganismes de la rhizosphère. La plus faible adsorption et affinité observée pour le GLY et le G6P vis-à-vis des minéraux du sol peut avoir des implications importantes sur leur disponibilité dans certains sols amendés avec des déchets organiques.

Les différentes affinités des diverses phases minérales pour les composés P peuvent également affecter leur disponibilité. Les minéraux testés peuvent être classés selon leur affinité pour le P comme suit : Oxydes de Fe/Al > substances humiques > minéraux argileux. La gibbsite est le minéral qui présente la plus grande quantité de sorption et la plus faible désorption des formes OP. En revanche, la montmorillonite ou la kaolinite ont montré une plus faible capacité de rétention des OP. Par conséquent, dans les sols où les phyllosilicates sont dominants, comme dans les régions subtropicales, l'OP peut être plus disponible dans ces sols. En outre, les formes OP montrent un taux de désorption plus lent par jour que les formes IP. Cela implique que lorsque les formes OP

sont utilisées comme engrais, elles peuvent se désorber lentement au rythme de l'absorption par les plantes, même à long terme.

Les résultats ont également montré que les complexes minéraux argileux-P fournissent du P rapidement mais sur une courte période. Cependant, le complexe montmorillonite-myo-IHP fournit du P de façon continue, mais davantage au cours du premier jour. Le complexe acide humique-P fournit du P lentement mais sur une longue période. Ces résultats mènent à la conclusion que le myo-IHP, bien que plus adsorbé, pourrait être efficacement disponible dans un sol où la montmorillonite est le minéral phyllosilicate dominant par rapport aux autres minéraux phyllosilicates (type 1:1). En outre, le retour et l'ajout de matières organiques comme les substances humiques dans le sol pourraient mieux gérer les OP et les rendre disponibles même dans la longue période de temps. La désorption des formes de P du complexe Fe/Al oxyhydroxide-P était très faible et diminuait plus rapidement. Cependant, nous avons constaté que le G6P se désorbait davantage de ces minéraux. Ceci peut être une implication importante dans les sols très altérés des régions tropicales, où les oxyhydroxydes de Fe/Al sont des minéraux dominants. De plus, comme nous l'avons montré ci-dessus, le G6P et le GLY sont moins affectés par les oxyhydroxydes de Fe/Al que la forme IP en ce qui concerne l'adsorption. Ce faible effet des oxyhydroxydes de Fe/Al sur ces formes OP, combiné à la plus grande désorption du G6P, suggère que l'OP pourrait être utilisé dans ces sols pour améliorer la nutrition en P des plantes.

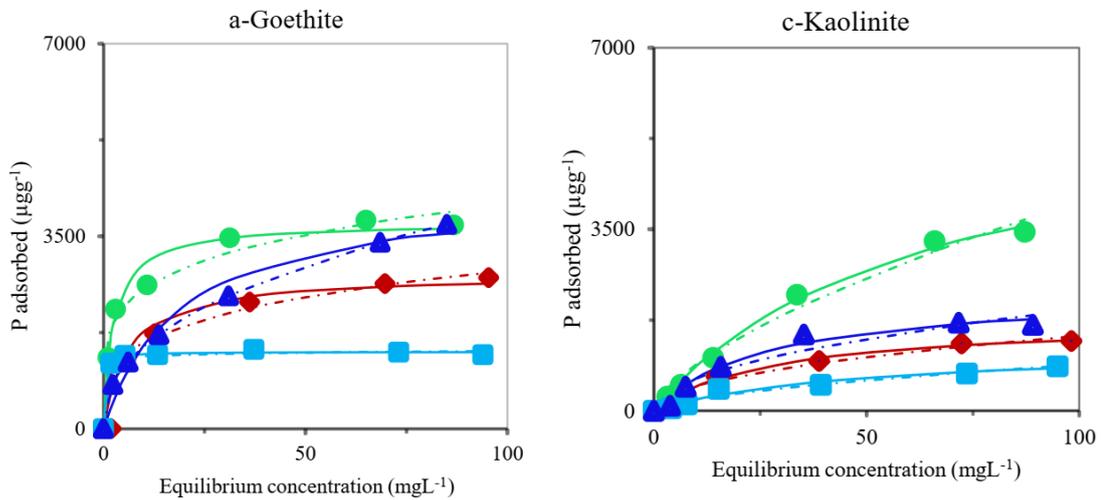


Figure 1: Isothermes d' adsorption des formes OP en 0.1 M KCl à pH 5.0: les symboles sont les points expérimentaux-x, les lignes continues les isothermes selon le formalism Langmuir et les lignes discontinues selon le formalisme Freundlich.

Nouveau zonage de l'exposition au retrait-gonflement des argiles (loi ELAN) : plus de 10,4 millions de maisons individuelles potentiellement très exposées

Antoni Véronique¹, Gourdiér Sébastien², Thauvin Mathieu³, Lilian Pugno⁴

¹ Commissariat Général au Développement Durable, 5 route d'Olivet - CS 16105, 45061 Orléans Cedex 2 - France

² BRGM, Direction Risques et Prévention, 3 av. Claude-Guillemin - BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France

³ Antea, 803 Boulevard Duhamel du Monceau, 45160 Olivet

⁴ MRN, 1 rue Jules Lefebvre - 75431 Paris cedex 9 - France

Mots-Clés : sols argileux, retrait-gonflement, exposition, enjeu, risque naturel

Les mouvements de terrain induits par le retrait-gonflement des argiles, et amplifiés par les épisodes de sécheresse, constituent un risque majeur en raison des dégâts matériels qu'ils provoquent. Pour prévenir ce risque majeur, l'article 68 de la loi ELAN impose la réalisation d'études de sol préalablement à la construction dans les zones d'exposition moyenne ou forte.

Un nouveau zonage de l'exposition au retrait-gonflement des argiles (BRGM, 2019) identifie ces zones particulièrement exposées. *In fine*, 10,4 millions de maisons individuelles (soit 54 %) sont fortement ou moyennement exposées aux mouvements de terrain liés au retrait-gonflement des argiles.

Description du phénomène

Mouvement de terrain naturel lent, le phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA) est à l'origine d'une déformation progressive du sol ou du sous-sol (MEEDDM, 2008 ; BRGM, 2016). Il peut provoquer des désordres dans les bâtiments, affectant principalement les maisons individuelles. Ces dernières sont particulièrement vulnérables en raison de leurs fondations généralement superficielles et dimensionnées sans la prise en compte de cet aléa ou réalisées sans prendre en compte les dispositions constructives inhérentes aux règles de l'art.

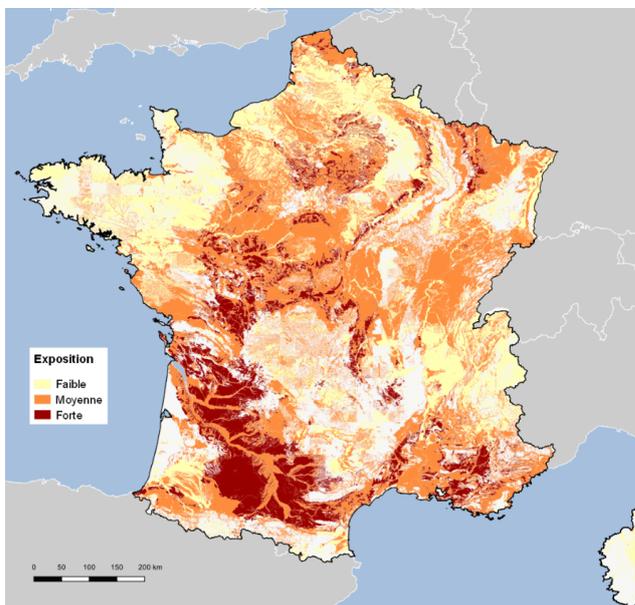
Le RGA constitue un risque majeur, susceptible de s'accroître sous l'effet du changement climatique. Le risque majeur se caractérise en effet, par de nombreuses victimes et/ou un coût important de dégâts matériels et des impacts sur l'environnement. Si les mouvements de sol induits par le RGA ne causent pas de dommages humains physiques immédiats, ils n'en demeurent pas moins un risque majeur en raison de l'ampleur des dégâts matériels qu'ils provoquent. Ce phénomène représente 20 % des arrêtés de catastrophe naturelle et 36 % des coûts d'indemnisation (CCR, 2020).

Contexte de l'étude

La nouvelle carte d'exposition du territoire au RGA (*cartes 1 et 2*) identifie les zones exposées au phénomène de mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols (BRGM, 2019). Les dispositions réglementaires s'appliquent dans les zones en exposition forte ou moyenne (article 68 de la loi ELAN).

Ce nouveau zonage intègre la carte de susceptibilité au RGA (source : BRGM, avant 2019) et les données actualisées et homogénéisées de la sinistralité observée (MRN). Si la susceptibilité moyenne ou forte au retrait-gonflement d'argiles concernait 24 % du territoire métropolitain avant 2019, ce degré d'exposition représente désormais 48 % (source : BRGM, 2019).

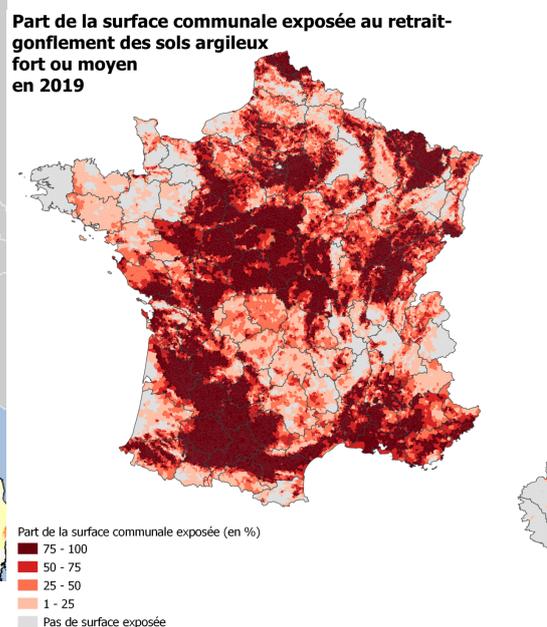
Carte 1 : exposition du territoire au RGA (référence 2019)



Note de lecture : 48 % du territoire est en zone d'exposition moyenne ou forte © BRGM

Source : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/exposition-du-territoire-au-phenomene>

Carte 2 : surface en exposition forte ou moyenne (référence 2019)



Source : BRGM, 2019. Traitements : SDES, 2021

En 2017, dans le cadre de sa participation à l'Observatoire national des risques naturels (ONRN), le CGDD/SOeS a produit un indicateur de vulnérabilité des communes au RGA à la demande de la DGPR. Il s'agissait alors d'analyser le niveau d'exposition des maisons individuelles au regard de la susceptibilité au RGA (source : BRGM, avant 2019), selon leur localisation sur le territoire des communes de France métropolitaine. Cet indicateur était également complété par une typologie de la vulnérabilité des communes métropolitaines (CGDD, 2017 a et b).

En 2021, cet indicateur d'exposition des maisons individuelles au RGA a été mis à jour par la CGDD/SDES pour alimenter les indicateurs de l'ONRN (CGDD, à paraître).

Matériel et méthode

La temporalité de cette mise à jour coïncide avec celle de la mission CGEDD-IGF portant sur la gestion des dommages liés au RGA sur le bâti existant (rapport CGEDD-IGF à paraître). Dans ce contexte, en lieu et place d'une mise à jour simple de l'indicateur, les modifications suivantes ont été prises en compte :

- i. utilisation du nouveau zonage de l'aléa réalisé dans le cadre de la loi Elan - exposition du territoire au RGA (source : BRGM, 2019) ;
- ii. utilisation du nombre de maisons individuelles issues des Fichiers démographiques sur les logements et les individus (source : Insee, 2017) en lieu et place des fichiers fonciers Majic (source : DGFIP, 2014) utilisée en 2017 ;
- iii. complétude de l'analyse en désagrégant les données relatives au nombre de maisons individuelles construites dans les zones exposées au RGA par périodes de construction de ces maisons. Quatre périodes de construction ont été retenues :

- a. avant 1921,
- b. entre 1921 et 1945,
- c. entre 1946 et 1975,
- d. après 1975.

Elles correspondent à des changements de modes constructifs et usuellement délimitées par les deux après-guerres et l'après-choc pétrolier. Ce dernier coïncide avec l'émergence du dispositif normatif (codification) encore en cours (il date d'un demi-siècle dans ses fondements) ;

- iv. analyse de l'effet du changement de zonage sur l'exposition des maisons individuelles ;
- v. utilisation de la thématique bâti de la BD TOPO® v3 de l'IGN
- vi. utilisation de la base de données des sinistres sécheresse indemnisés SILECC® de la Mission Risques Naturels.

L'ensemble des croisements géomatiques réalisés entre l'aléa - susceptibilité au RGA (source : BRGM, avant 2019) ou exposition au RGA (source : BRGM, 2019) – et les maisons individuelles (source : Insee, 2017) sont agrégés par commune.

Résultats

Selon l'indicateur d'exposition des maisons individuelles au RGA produit en 2017, environ 4,3 millions de maisons individuelles étaient alors construites dans des zones en aléa fort ou moyen (soit 23 % de l'habitat individuel).

La mise à jour de cet indicateur avec le nouveau zonage de l'exposition au RGA (*carte 3*), montre que ce sont globalement 10,4 millions de maisons individuelles (soit 54 % de l'habitat individuel) qui sont construites en exposition forte ou moyenne (référence 2021). 44 % de ces maisons ont été construites après 1976 (*carte 4*).

L'analyse selon quatre périodes de construction montre la répartition suivante :

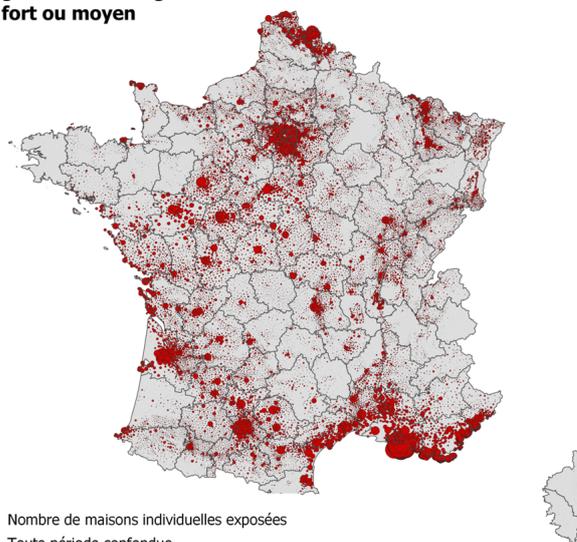
- 3,1 millions construites avant 1921 (soit 16 % de l'habitat individuel) ;
- 0,7 millions construites entre 1921 et 1945 (soit 3,5 %) ;
- 2,0 millions construites entre 1946 et 1975 (soit 10,6 %) ;
- 4,6 millions construites après 1975 (soit 24 %).

Enfin, l'analyse de la sinistralité survenue en zone d'exposition forte ou moyenne, croisée avec les bâtiments de la BD TOPO montre la répartition suivante :

- 11% des sinistres sont survenus sur des maisons construites avant 1921 ;
- 7% des sinistres sont survenus sur des maisons construites entre 1921 et 1945 ;
- 24% des sinistres sont survenus sur des maisons construites entre 1946 et 1975 ;
- 58% des sinistres sont survenus sur des maisons construites après 1975.

Carte 3 : maisons en exposition forte ou moyenne (référence 2021)

Nombre de maisons individuelles exposées à l'aléa retrait-gonflement d'argiles fort ou moyen

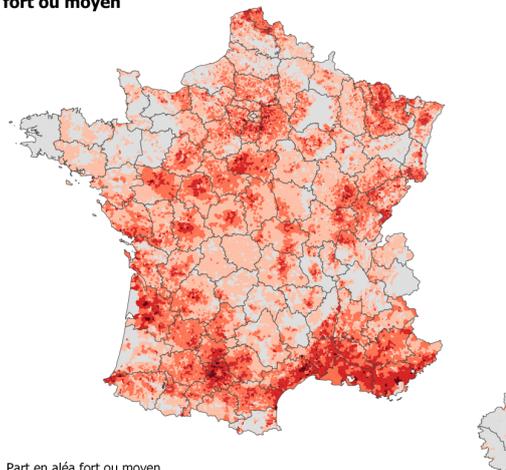


Nombre de maisons individuelles exposées
Toute période confondue
● 20 000

Sources : BRGM, 2019 ; Fideli, 2017. Traitements : SDES, 2021

Carte 4 : part de maisons construites après 1976 en exposition forte ou moyenne (référence 2021)

Part des maisons individuelles construites après 1976, exposées au retrait-gonflement d'argiles fort ou moyen



Part en aléa fort ou moyen
Part des maisons construites après 1976 exposées (en %)
■ 75 - 100
■ 50 - 75
■ 25 - 50
■ 1 - 25
■ Pas de maison exposée

Sources : BRGM, 2019 ; Fideli, 2017. Traitements : SDES, 2021

Références

- CGDD, à paraître. Cartographie de l'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles. Note méthodologique. 54 p.
- CCR, 2020. [Bilan sur les Catastrophes Naturelles en France 1982-2019](#). 100 p.
- CGDD, 2017 (a). [Retrait-gonflement des argiles : plus de 4 millions de maisons potentiellement très exposées](#). CGDD, Datalab essentiel n° 122 - Octobre 2017, 4 p.
- CGDD, 2017 (b). [La vulnérabilité des communes à l'aléa retrait-gonflement des argiles : méthode de calcul et classification typologique](#). CGDD, 2017. Note de méthode. 13 p.
- BRGM, 2016. [Le retrait-gonflement des argiles, Dossier enjeux des Géosciences, BRGM, juillet 2016, 6 p.](#)
- MEEDDM, 2008. Le retrait-gonflement des argiles : comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel?, ministère de l'Environnement, ed. 2008, 32 p.

Sitographie

- Caisse centrale de réassurances : <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/>
- Observatoire national des risques naturels : <https://www.georisques.gouv.fr/risques/observatoire-national-des-risques-naturels>
- Portail GéoRisques :
 - <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/exposition-du-territoire-au-phenomene>
 - <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/recommandations-et-reglementations-0>
 - <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/exposition-du-territoire-au-phenomene> ;
- Prévention des risques majeurs : <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-risques-majeurs>

- Programme national de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles : <http://www.brgm.fr/projet/cartographie-alea-retrait-gonflement-sols-argileux>
- Service de la donnée et des études statistiques (SDES) du ministère de la Transition écologique (MTE) : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/retrait-gonflement-des-argiles-plus-de-4-millions-de-maisons-potentiellement-tres-exposees?rubrique=43&dossier=200>

Site l'environnement en France : <https://notre-environnement.gouv.fr/site-ree/themes-ree/risques-nuisances-pollutions/risques-naturels/autres-risques-naturels/article/le-retrait-gonflement-des-argiles?type-ressource=liens&ancreretour=ancreretour4158&lien-ressource=5185&theme-ressource=433>

Approche géochimique à la prédiction de la salure dans les aridosols nus : l'exemple de la cuvette de Ouargla le bas Sahara Algerien.

Abdelhak. IDDER¹, I-E. NEZLI² et Tahar. IDDER¹, Sophie CORNU³

¹ Université de Ouargla, Laboratoire de recherche sur la phoeniciculture, email: haki.idder@gmail.com tahar_id@yahoo.fr; tel: 0668391347

² Université de Ouargla, Laboratoire de Géologie du Sahara, email: imedinezli@yahoo.fr

³ Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) Aix-en-Provence cedex 4. Email : cornu@cerge.fr

Mots clés : aridosol nu, sels, nappe phréatique, géochimie, Ouargla

Ce travail présente une analyse de la dynamique des processus de salinisation dans un transect d'aridosol nu de la cuvette de Ouargla. Laquelle cuvette se caractérise par une aridité nettement exprimée et une sécheresse permanente.

Le climagramme d'Emberger place notre région dans l'étage bioclimatique hyper aride avec une pluviométrie qui ne dépasse pas 40mm/an, alors que l'évaporation annuelle est de l'ordre de 2000mm/an.

Ce transect d'aridosol n'a jamais connu de mémoire d'hommes d'actions anthropiques, ni par sa mise en culture ni par son irrigation. Il est dépourvu de végétation. Il est soumis à l'influence des climats estival et hivernal présentant un fort pouvoir évaporant en surface et une nappe phréatique de faible profondeur à la base. Cette nappe, classée C₅S₃, constitue un lieu privilégié pour l'accumulation et la stagnation de sels répartis en proportions variables selon les horizons (Idder et al., 2014). Ce sol nu a été analysé à travers huit profils creusés suivant le sens d'écoulement des eaux de la nappe phréatique. Trois profils ont été réalisés en été, six en hiver (figure 1). Le profil P3 a été échantillonné lors des deux campagnes de terrain. La texture de ce sol est sablo-limoneuse d'où la faible expression des phénomènes d'échange.

A partir du profil salin des horizons examinés au cours des deux saisons, il est observé que tous les ions dosés subissent une ascension disproportionnée du bas vers le haut du profil au bénéfice des concentrations estivales. Il est observé de même que le déplacement horizontal de la salinité suit le sens du cours d'eau phréatique. Les concentrations en ions mesurées indiquent un déséquilibre parmi les cations au profit du Na⁺ secondé du Ca²⁺ et parmi les anions en faveur du chlore secondé du SO₄²⁻. La méthode théorique de BAZILEVICH et PANKOVA (1968) basée sur la combinaison entre les cations et les anions, permet de mettre en évidence la présence majoritaire du salant blanc, identifié par les sels NaCl et Na₂SO₄, indicateurs de salure.

Les autres sels mis en évidence, le Ca(HCO₃)₂ - témoin du salant noir - et le MgCl₂, présentent des concentrations moins élevées. Par ailleurs, les résultats indiquent que les différents sels s'accumulent prioritairement en surface et en zone médiane du profil, lui conférant ainsi le caractère salin type A en hiver ou le type A et B en été (Idder et al., 2013). Les importantes valeurs de conductivité électrique, mesurées sur des extraits aqueux avec un rapport solide/solution de 1/5 et pouvant atteindre des valeurs de 62.5dS/m, associées à la tendance saline neutre (7 < pH < 8), démontrent le caractère salin de ce sol.

Par ailleurs les ions chlore, sodium et calcium majoritaires dans la solution du transect de sol étudié désignent les facies chimiques diversifiés en été et unique chlorure sodique en hiver. Cette distinction de facies chimiques en relation avec les deux types salins mis en évidence précédemment est expliquée par la différence de mobilité des ions plus accentuée en été.

La modélisation thermodynamique à 25 °C à l'aide du logiciel "Phreeqc, v.2", (Parkhurst et al, 1999) a permis la caractérisation et la détermination des intrusions et précipitations minérales dans les textures sablo-limoneuses des sols quaternaires de la zone d'étude.

Le travail a consisté à tester la salinité des sols nus résultant de la concentration des eaux de la nappe phréatique sous-jacente. L'estimation de la concentration des eaux se fait à l'aide d'un traceur chimique de chlore. Cette méthode a été utilisée par Valles (1987).

Le chlore est un bon indicateur de l'état de concentration d'une eau de nappe ou solution d'un sol, puisqu'il ne précipite qu'à des forces ioniques élevées (Droubi et al. 1976). Il est considéré comme un traceur stable et l'élément chimique le plus conservatif des évaporites. Il est très soluble et rarement impliqué dans les précipitations salines. Il n'intervient pas dans les phénomènes d'oxydo-réduction. Il est peu influencé par l'intervention des bactéries. On peut ordonner donc les analyses selon leur teneur en ion chlore et suivre l'évolution de la molalité (en mé/l) de chaque élément majeur (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+) depuis les échantillons d'eau les plus dilués aux échantillons les plus concentrés en fonction de la molalité croissante de Cl^- . Le facteur de concentration (F_c) des eaux a été estimé à partir du rapport entre la teneur en chlorure d'une eau et la plus petite teneur en chlorure observée sur l'ensemble des échantillons (nappe superficielle et solution du sol).

Dans un diagramme bi-logarithmique, nous avons placé en ordonnées les valeurs du log molalité et en abscisses le log du facteur concentration. Le degré de saturation est apprécié par un Indice de Saturation (IS), tel que : $\text{IS} = \text{Log} (\text{IAP}/\text{K})$; avec IAP : est le produit d'activité ionique, K : est la constante d'équilibre.

L'approche géochimique modélisée a mis en évidence pour tous les profils examinés une affinité accrue entre le traceur chlore et les ions les plus rependus dans la solution du sol. Il a été montré qu'à partir de log facteur de concentration $\log F_c \leq 0,2$ pour l'été et $\log F_c = 0$ pour l'hiver que la majorité des carbonates sont sursaturées, d'où leurs précipitations prioritaires surtout sur les horizons superficiels et de surface. Les sels carbonatés concernés par cette précipitation, à l'exception du Na_2CO_3 et NaHCO_3 , sont essentiellement la calcite (CaCO_3), la magnésite (MgCO_3) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Cette précipitation est observée dans tous les compartiments du sol. Par contre, la huntite, elle se manifeste uniquement dans quelques horizons. Concernant les solutions sulfatées, le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et l'anhydrite CaSO_4 , elles évoluent simultanément avec le traceur chlore correspondant à l'indice de saturation $(\text{IS}) = \pm 0.5$. Leurs précipitations sont constatées à partir de $F_c = 1.24$, soit, pour des concentrations en ions chlorures supérieures à 280 mé/l et en ions sulfates dépassant 324 mé/l. Enfin, parmi les minéraux solubles, l'halite (NaCl) est restée insaturée malgré ses concentrations élevées.

En épilogue la modélisation thermodynamique appliquée aux concentrations ioniques trouvées dans la solution des aridisols à textures sablo-limoneuses montre que l'ordre de précipitation des minéraux est le même pour les différentes textures ; les substances chimiques carbonatées suivies des gypsites. En dernier lieu les sels réputés pour leurs grandes solubilités.

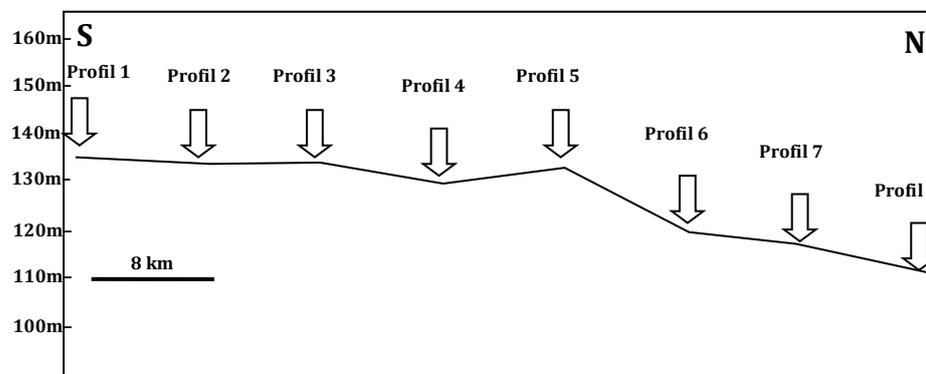
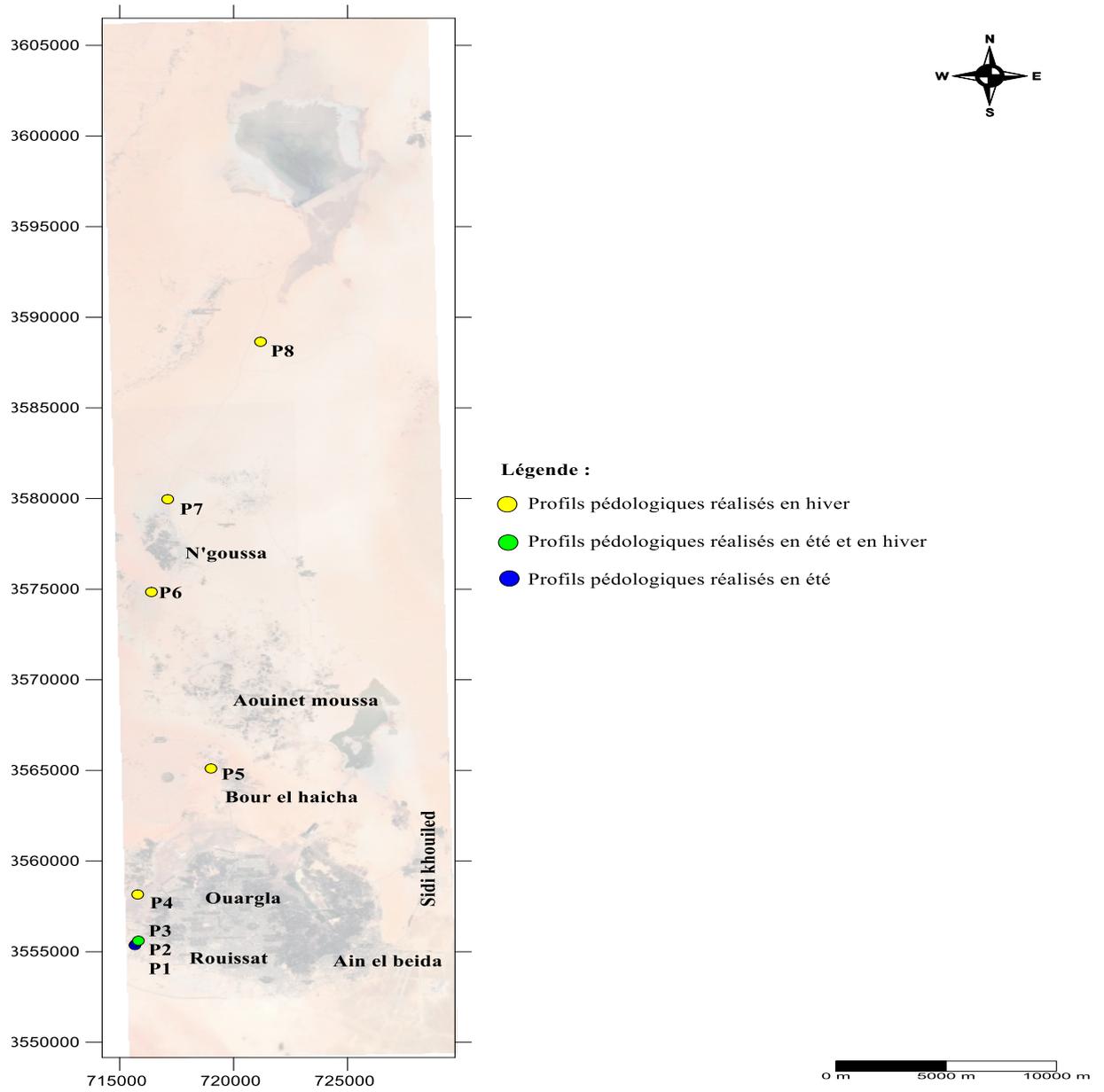


Figure 1 : Protocole d'étude

1. Idder A., Idder T., Nezli I.E. et al. 2014. Compartimentation et accumulation estivale des sels neutres dans les aridosols sableux nus de la cuvette d'Ouargla (Sahara algérien) *Lebanese Science Journal*, Vol. 15, No. 1, 2014, pp. 41-50.(2014).
2. Valles, V. 1987. Etude et modélisation des transferts d'eau et de sel dans un sol argileux. Application au calcul de doses d'irrigation, *Revue des Sci. Géol*, Mém, 79, 148 p.(1987)
3. Droubi A. Fritz B. et Tardy Y. 1976. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calculs appliqués à la prédiction de la salure des sols et des dos optimales d'irrigation. *Cahiers O.R.S.T.O.M., série pédologie, VOL.XIV, n° 1, pp.13-38.*(1976)
4. Idder T., Idder A., Cheloufi H. et al. 2013. La surexploitation des ressources hydriques au Sahara algérien et ses conséquences sur l'environnement. Un cas typique : l'oasis de Ouargla (Sahara septentrional). *Techniques Sciences Méthodes*, 5, 31-39.(2013)
5. Bazilevich, n.i. And pankova, E.I. 1968. A tentative of classifying soils according to salinization. *Pachvavedena*, 11: 3-16.

Les sols de polders Sahéliens du lac Tchad (Bol) : Des sédiments alluvionnaires aux sols différenciés.

ADOUM A. Abgassi¹, Didier BLAVET², Michel BROSSARD³

¹Université de N'Djamena, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Département de Géologie, BP 1027, N'Djamena, TCHAD, abgassi79@gmail.com

²UMR IRD-Eco&Sols Montpellier SupAgro, Bât. 12 2, Place Viala 34060 Montpellier cedex 2
michel.brossard@ird.fr

Mots-Clés : Sédiments, maturation physique, sols salins, sols alcalins, Polders

Les polders Sahéliens du Lac Tchad de la région Bol présentent une alternative agroéconomique intéressante pour la population du pourtour du lac Tchad. Ces sols ont une teneur élevée de matière organique, en moyenne 24 % dans certains niveaux bien localisés de tourbe, à 7 % dans les argiles structurées. Ils ont un potentiel agronomique très élevé. Trente-six (36) profils moyens (composites) de sols ont été décrits et analysés.

L'échantillonnage a été effectué dans quatre sites différents (t_0 , t_{10} , t_{60} , et t_{65}), selon l'âge de poldérisation. Dans chaque site des échantillons ont été prélevés par incréments de 10 cm 1 m. Au total, 360 échantillons moyens ont été prélevés. Le nombre de profils de sols échantillonnés varie de 3 à 16 profils/site.

L'objectif est de caractériser les sols de polders dans le paysage interdunaire (bas-fonds) de la rive nord-est du lac Tchad afin de réaliser un premier diagnostic pouvant classer différents types de sols et de tenter leur correspondance avec la classification de la WRB. Ainsi qu'une connaissance sur l'évolution des sols post poldérisation. Le premier critère est le début de l'acquisition d'une horizonation, c'est donc le cas de l'horizon de surface qui s'individualise bien, d'autant plus que les travaux aratoires favorisent l'acquisition de la structure bien qu'elle puisse être dégradée en cas de sursalinité.

Cette structuration ou maturation physique s'exprime nettement par l'augmentation de la consistance, exprimée par la (DA) qui augmente à mesure que les matériaux se structurent dans les horizons et lors de la perte en eau et l'acquisition d'une porosité. La structuration est perceptible dans les polders anciens (t_{60} , et t_{65}) par l'analyse, bien que nous l'observions aussi sur le terrain. Les sols sont essentiellement constitués de sols hydromorphes et halomorphes correspondant à l'ordre de *Fluvisols* incluant les groupes des Solonetz et Solonchaks.

Caractérisation des propriétés physiques des sols du Sud-est forestier de la Côte d'Ivoire pour la mise en valeur agricole dans la localité d'Azguié.

Ettien Djétchi Jean Baptiste^{1,2}, Guéty Thierry Philippe², Akotto Odi Faustin²

1. Centre Suisse de Recherches Scientifiques Jb.ettien@csrs.ci
2. Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM, Filière Pédologie et Agriculture Durable (PAD)

Mots-Clés : Propriétés physiques des sols, Cambisols, potentialités agronomiques, Côte d'Ivoire

La localité d'Azaguié est une zone sujette à une forte pression foncière du fait de sa proximité avec la métropole Abidjan (45 km). La production agricole dans cette localité est régulièrement soumise à une dégradation des terres à cause de l'impossibilité de mise en jachère des terres arables. Dans cette localité, peu d'études pédologiques y ont été menées. Ainsi, en absence d'usage d'intrants synthétiques, il n'existe aucun mode de restauration et de maintien de la fertilité des sols.

Cette étude a donc été initiée afin de mettre en exergue les potentialités agronomiques des sols de la localité à travers la caractérisation de quelques propriétés physiques clés et d'en établir les corrélations entre elles. L'établissement des corrélations a permis de mettre en évidence les limites des fonctions des sols à vocation agricole et de proposer des solutions d'aménagement durable.

Pour ce faire, une toposéquence a été implantée, et des fosses pédologiques y ont été ouvertes suivant l'échelle 1/2500. Les profils de sols ont été décrits le long de la toposéquence horizon par horizon. Des échantillonnages de sols des différents horizons ont permis de déterminer les proportions relatives de terre fine et d'éléments grossiers, ainsi que le taux d'humidité et les couleurs des sols. Les sols rencontrés sur le site, majoritairement les cambisols, présentent pour l'ensemble une forte charge en éléments grossiers (>60%) et une mauvaise qualité du drainage interne. Ces contraintes peuvent être levées par les moyens techniques y afférant tels que les techniques culturales, l'itinéraire technique et le choix des cultures. Les cultures appropriées selon les segments topographiques ont été proposées en tenant compte de leurs systèmes d'enracinement et de leur exigence hydrique.

Session 6

« Notion de qualité des sols
et indicateurs »

Session 6 n° 1

Santé des sols, notion scientifique ou simple métaphore sociétal ? Regards croisés d'un écologue et d'une ethnopédologue sur la santé des sols

Alain Brauman¹, Lola Richelle²

¹ Eco&Sols, IRD, INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, Montpellier, France

² Agroecology Lab, Brussels Bioengineering school, ULB, Bruxelles, Belgique

Mots-Clés : fertilité des sols, Qualité des sols, Santé des sols, indicateurs, fonctionnement du sol, aspect historique, écologie des sols, ethnopédologie,

Si l'on assiste à un développement quasi exponentiel des articles concernant la santé des sols (soil health) depuis une dizaine d'année, cette notion fait toujours débat au sein de la communauté scientifique des sciences du sol. Pour ses détracteurs, ce terme est une métaphore anthropocentrique (le sol n'est pas un organisme), un terme plus sociétal que scientifique, difficilement quantifiable et trop dépendant des utilisateurs. Pour ses défenseurs, ce terme inclus d'une part la vision des écologues, d'un sol perçu comme un écosystème complexe et vivant et d'autre part la pratique de l'agriculture qui implique de prendre soin des sols cultivés afin de permettre une production alimentaire saine et durable.

Qu'il s'agisse d'une métaphore ou d'un concept scientifique, cette notion amène à penser notre rapport aux sols et cela n'est pas anodin. Cette notion découle notamment de l'évolution de notre perception du sol, perçu d'abord comme une ressource (fertilité), puis comme un capital (qualité) et plus récemment comme système socio-écologique (santé).

La notion de santé des sols induit une vision intégrée et dynamique du système sol, en tenant compte de son fonctionnement à long terme (résilience). Elle permet également un dialogue fécond entre disciplines scientifiques mais également avec la société civile. A partir de ce constat, cette présentation se propose de faire le point sur cette notion controversée en croisant les regards d'un écologue et d'une ethnopédologue. L'idée n'est pas de clore le débat mais plutôt d'essayer de le contextualiser d'un point de vue historique, scientifique et sociétal

Incertitudes liées aux mesures des stocks de carbone organique et d'azote dans les sols agricoles

Lucas Tabaud¹, Christian Walter¹, Clotilde Blancfene¹, Chantal Gascuel¹, Blandine Lemerancier¹, Didier Michot¹ and Pascal Pichelin¹

¹UMR SAS, INRAE, Institut Agro, Rennes, France

Mots-Clés : surveillance des sols, incertitudes, carbone organique, azote total

Le sol est au centre des cycles géochimiques du carbone et de l'azote. Il est d'ailleurs identifié comme un puits de carbone mais également comme un compartiment de stockage pour l'azote. L'étude de l'évolution conjointe des stocks de carbone organique (SCOS) et d'azote total du sol (SNTS) est intéressante car ces deux éléments sont des indicateurs du bon fonctionnement du sol. La surveillance des SCOS et des SNTS a donc un lien direct avec l'atténuation du changement climatique (objectif 4 pour mille), la fertilité des sols (service écosystémique de fourniture des besoins aux cultures) ou même la santé des sols (qualité des matières organiques).

Actuellement, il existe deux principales méthodes pour surveiller la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol : (i) la modélisation et, (ii) la surveillance directe sur le terrain à intervalles de temps réguliers. La première méthode est généralement préférée à la deuxième, car le suivi des stocks par des mesures directes et à intervalles de temps réguliers peut nécessiter des ressources matérielles et financières importantes tout en ayant des risques de ne pas conclure sur la significativité des résultats au vue des incertitudes que peut comporter cette méthode. En effet, globalement, les variations détectées dans la plupart des études sont de l'ordre de quelques $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et $\text{mgN.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Cependant, favoriser la modélisation a pour conséquence de créer un manque de données importantes au sein la communauté scientifique.

Ainsi, cette étude vise à mieux comprendre les incertitudes qui accompagnent la surveillance des stocks par mesure directe au champs. Pour cela, elle se décline en plusieurs objectifs :

- (i) Comparer 3 méthodes d'estimation des incertitudes (stochastiques, déterministe et expérimentale) sur les SCOS et les SNTS dans la couche supérieure du sol (0-25 cm)
- (ii) Identifier les principales sources de variabilité en utilisant la décomposition de la variance calculée sur les SCOS et les SNTS
- (iii) Conclure sur la significativité des évolutions des SCOS et des SNTN au cours du temps

L'étude se base sur les données issues de trois campagnes menées sur trois années distinctes (2013, 2018 et 2020), sur un bassin versant agricole breton (France) de 1200 hectares avec un système agricole de polyculture et élevage intensif.

En 2013 et 2018, les deux campagnes visaient à étudier les propriétés de sol et leur évolution au cours du temps. Ces deux campagnes permettaient un échantillonnage systématique du sol sur 108 sites identiques. La campagne 2020 permettait également un échantillonnage systématique du sol sur 21 sites choisis parmi ceux de 2013/2018 mais également d'effectuer une répétition des prélèvements sur site grâce à la rotation de trois groupes d'opérateurs experts sur les 21 points et ce, afin de prendre en compte les incertitudes induites par le changement d'opérateur lors d'un suivi au cours du temps.

La comparaison des méthodes d'estimation des incertitudes a permis de constater que ces trois méthodes fournissent des résultats équivalents avec respectivement des moyennes d'écart-types estimés de 0,85 ; 0,74 et 0,68 kgC.m^{-2} pour les SCOS pour les approches stochastique,

déterministe et expérimentale et de 0,08 ; 0,07 et 0,06 kgN.m⁻² pour les SNTS. La décomposition de la variance a identifié que la variation naturelle de la masse de terre fine à courte distance est la source principale de variabilité sur les résultats finaux de stocks (77 % de la variance totale). Cependant, au moins 16 % des incertitudes sont directement dues à la manipulation de l'opérateur. Cette proportion de variabilité est par conséquent réductible.

Enfin, en utilisant l'approche stochastique avec un seuil de confiance à 90 %, des variations temporelles significatives ont pu être constatées : sur 108 sites, 59 ont des variations de SCOS significativement différents et 77 pour les SNTS. Finalement, entre 2013 et 2018, une majorité de sites ont perdu du carbone organique ($-0,03 \pm 0,07$ kgC.m⁻².an⁻¹) et gagné de l'azote total ($0,006 \pm 0,005$ kgN.m⁻².an⁻¹). Ces observations sont visibles sur la figure ci-dessous.

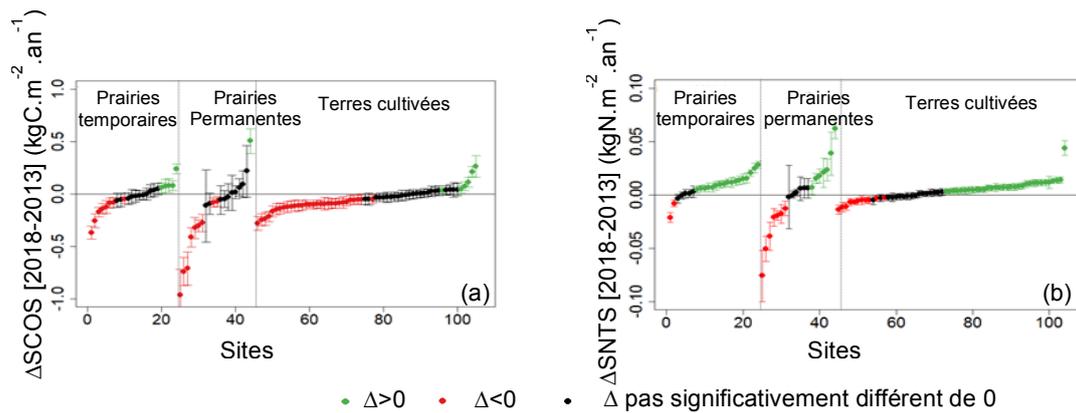


Figure : Différences de stocks de carbone organique (a) et de l'azote total (b) sur les 108 sites entre 2013 et 2018. L'incertitude est estimée avec un seuil de confiance de 90%.

Pour conclure, l'estimation des incertitudes sur les stocks de carbone organique ou d'azote totale peut s'effectuer par différentes méthodes qui sont apparues équivalentes en termes de résultats dans cette étude. Le choix de la méthode repose sur la capacité à mettre en place les différentes étapes des méthodes plutôt que sur la précision de celles-ci. L'incertitude sur les stocks s'explique principalement par la variabilité naturelle du sol mais peut encore être réduite par un meilleur contrôle du protocole et de la qualité des prélèvements. Enfin, dans le contexte agricole de la zone d'étude, la précision de la mesure directe est apparue suffisante pour détecter l'évolution des SCOS et du SNTS sur une période de 5 ans.

Les résidus d'abattage favorisent une restauration rapide de la santé du sol après la coupe rase de plantations d'hévéas : suivi diachronique sur deux types de sol contrastés en Côte d'Ivoire

Perron Thibaut^{a,b,c}, Kouakou Aymard^{d,e}, Simon Charlotte^d, Mareschal Louis^{c,d}, Gay Frédéric^{a,b}, Laclau Jean-Paul^{c,d}, Brauman Alain^d

^a CIRAD, UMR ABSys, F-34398 Montpellier, France.

^b ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

^c CIRAD, UMR Eco&Sols, F-34398 Montpellier, France

^d Eco&Sols, Univ. Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

^e Nangui Abrogoua University, Ecology and Sustainable Development Laboratory, Abidjan, Ivory Coast.

Mots-Clés : hévéa, résidus d'abattage, restauration, perturbation, biodiversité du sol.

La santé des sols est définie comme la capacité des sols à assurer les multiples fonctions nécessaires au maintien de la stabilité des écosystèmes dans le cadre des contraintes environnementales (Pawlett et al., 2021). Ces fonctions émergent d'interactions complexes entre les paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol mais leur fourniture peut être menacé par les pratiques anthropiques. Les plantations d'hévéas (*Hevea brasiliensis*), première source mondiale de caoutchouc naturel, constituent un modèle pertinent pour étudier l'effet de pratiques agricoles sur les fonctions du sol. Un cycle de plantation d'hévéas s'étend sur 25 à 40 ans et les cycles de replantation s'enchaînent sur les mêmes parcelles. La coupe rase et la préparation du terrain (principalement l'andainage et le sous-solage) entre deux cycles culturels impliquent des passages d'engins lourds dans les plantations commerciales. Ces pratiques entraînent des perturbations importantes du sol. Historiquement, les résidus d'abattage, c'est-à-dire le tronc, les branches, les feuilles et les racines du peuplement coupé, étaient brûlés à la replantation. Aujourd'hui, la pratique la plus courante dans les plantations industrielles consiste à exporter certains résidus d'abattage (principalement le tronc et les branches) pour des valorisations économiques. Compte tenu de la grande quantité de carbone et de nutriments accumulés dans l'arbre tout au long d'un cycle de plantation, cette exportation pourrait être responsable d'une diminution de la santé du sol au fil des cycles de replantation (Perron et al., 2021).

La définition de la santé des sols est basée sur la mesure des fonctions du sol liées aux assemblages biologiques (Kibblewhite et al., 2008). Nous avons utilisé Biofunctool[®] pour évaluer la santé des sols à travers trois fonctions : le cycle des nutriments, la transformation du carbone et le maintien de la structure (Thoumazeau et al., 2019). Biofunctool[®] contribue à une approche intégrée de l'évaluation des sols en utilisant des indicateurs fonctionnels du sol, qui prennent en compte les interactions complexes entre les propriétés physico-chimiques et les organismes vivants du sol. Parmi ces organismes, la macrofaune joue un rôle majeur puisqu'elle est directement impliquée dans la fourniture multiples fonctions du sol. Des études récentes montrent que la diversité taxonomique de la macrofaune du sol est particulièrement importante pour soutenir ces fonctions (Delgado-Baquerizo et al., 2020).

Nos objectifs étaient : (1) de quantifier les effets de la perturbation résultant de la coupe rase et de la préparation du terrain sur les fonctions du sol ; (2) d'évaluer les effets de pratiques de gestion contrastées des résidus d'abattage et du couvert de légumineuses sur la restauration des fonctions du sol ; (3) d'explorer les relations entre la diversité de la macrofaune du sol et la santé du sol pendant le processus de restauration. Pour cela, nous avons effectué des mesures diachroniques des fonctions du sol juste avant la coupe rase de la plantation puis pendant 18 mois après la replantation, dans deux plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire établies dans des conditions

édaphiques contrastées (site de la SAPH, argile : 10% ; site de la SOGB : argile : 23%). Le dispositif expérimental, répliqué sur les 2 sites, comprenait 4 traitements répétés 4 fois, comme suit :

- R0L0 : traitement contrôle. Tous les résidus d'abattage (R) sont retirés de la parcelle. Aucune légumineuse (L) semée après la coupe rase.
- R0L1 : tous les résidus d'abattage sont retirés de la parcelle. La légumineuse *Pueraria phaseoloides* semée après la coupe à blanc.
- R1L1 : tronc retiré de la parcelle. Branches, feuilles et souches restantes. La légumineuse *Pueraria phaseoloides* semée après la coupe à blanc. Ce traitement est représentatif de la pratique courante effectuée dans la plupart des plantations commerciales d'hévéas en Afrique.
- R2L1 : aucun résidus d'abattage n'a été enlevé. Tronc, branches, feuilles et souches laissés sur place. La légumineuse *Pueraria phaseoloides* semée après la coupe à blanc.

Sur les deux sites, la coupe rase et la préparation du terrain ont considérablement perturbé les fonctions de transformation du carbone et du cycle des nutriments et, dans une moindre mesure, la fonction de maintien de la structure. La restitution des résidus d'abattage a permis de restaurer complètement la fonction de transformation du carbone (Fig. 1) et de maintien de la structure, 12 à 18 mois après la coupe rase. En revanche, aucune restauration de la fonction du cycle des nutriments n'a été observée au cours de la période d'étude. La présence de légumineuse a principalement conduit à une meilleure restauration de la fonction de transformation du carbone. Enfin, nous avons mis en évidence des relations fortes ($P \leq 0,001$; $R^2 = 0,62-0,66$) entre la diversité de la macrofaune du sol et la santé du sol. Les résultats de cette étude sont cohérents entre les deux sites, malgré des propriétés édaphiques contrastées. Ces similitudes suggèrent que l'ajout de grandes quantités de matières organiques, par les résidus d'abattage et/ou la légumineuse, est essentiel pour favoriser les fonctions du sol et donc pour la durabilité des plantations d'hévéas.

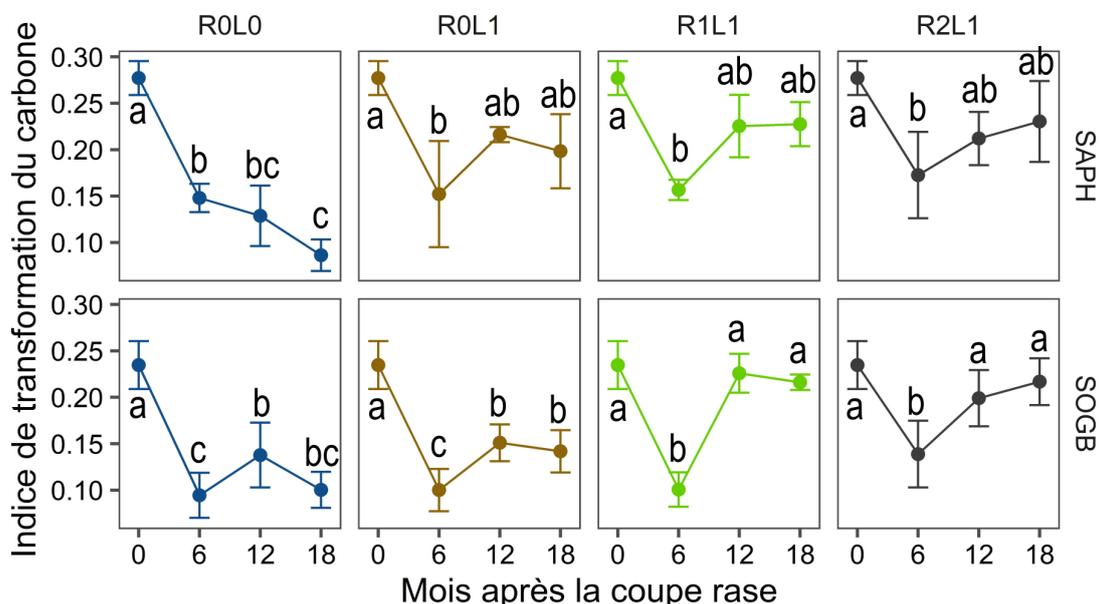


Fig.1 : Evolution de l'indice de transformation du carbone après la coupe rase dans les différents traitements et sur les deux sites d'études (SAPH et SOGB) (n = 4). Les différentes lettres indiquent des différences significatives de l'indice entre les mois, au sein d'un même traitement et d'un même site, après un test de Tukey ($P < 0.05$).

Références

Delgado-Baquerizo, M., Reich, P.B., Trivedi, C., Eldridge, D.J., Abades, S., Alfaro, F.D., Bastida, F., Berhe, A.A., Cutler, N.A., Gallardo, A., García-Velázquez, L., Hart, S.C., Hayes, P.E., He, J.-Z., Hseu, Z.-Y., Hu, H.-W., Kirchmair, M., Neuhauser, S., Pérez, C.A., Reed, S.C., Santos, F., Sullivan, B.W., Trivedi, P., Wang, J.-T., Weber-Grullon, L., Williams, M.A.,

- Singh, B.K., 2020. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution* 4, 210–220. doi:10.1038/s41559-019-1084-y
- Kibblewhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 685–701. doi:10.1098/rstb.2007.2178
- Pawlett, M., Hannam, J.A., Knox, J.W., 2021. Redefining soil health. *Microbiology* 167. doi:10.1099/mic.0.001030
- Perron, T., Mareschal, L., Laclau, J.P., Defontaine, L., Deleporte, P., Masson, A., Cauchy, T., Gay, F., 2021. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations established on two soil types: Implications for nutrient management over the immature phase. *Industrial Crops and Products* 159, 1–13. doi:doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113084
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., Brauman, A., 2019. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators* 97, 100–110. doi:10.1016/j.ecolind.2018.09.023

Microbioterre : Quels indicateurs de microbiologie intégrer dans l'analyse de terre pour améliorer la gestion des restitutions organiques ?

Cusset Elodie¹, Bennegadi-Laurent Nadia¹, Deschamps Thibaud², Houot Sabine³, Leclerc Blaise⁴, Perrin Anne-Sophie⁵, Recous Sylvie⁶, Riah-Anglet Wassila¹, Roussel Pierre-Yves⁷, Trinsoutrot-Gattin Isabelle¹, Valé Matthieu⁸, Barbot Christophe⁹

¹UNILASALLE- Campus Rouen, ²ARVALIS, ³INRAE- UMR ECOSYS, ⁴ITAB, ⁵TERRES INOVIA, ⁶INRAE - UMR FARE, ⁷Chambre d'agriculture de Bretagne, ⁸AUREA AgroSciences, ⁹Chambre d'agriculture d'Alsace

Mots-Clés : Analyse de terre, indicateurs microbiologiques, restitutions organiques

La gestion vertueuse des systèmes de culture implique le recyclage des nutriments issus de la biodégradation des matières organiques (MO) restituées aux sols, tout en répondant aux objectifs de stockage de carbone (C) dans le cadre de l'atténuation du changement climatique lié aux surplus d'émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les outils opérationnels permettant d'optimiser simultanément ces deux fonctions manquent encore. C'est dans ce contexte que le projet Microbioterre se propose d'intégrer des analyses microbiologiques aux analyses de terre de routine pour élargir le diagnostic et le conseil pour la gestion des pratiques culturales restituant du carbone au sol. Pour cela, un menu analytique et son référentiel d'interprétation pourront être proposés à différents laboratoires d'analyses habitués à travailler directement avec les agriculteurs. Grâce à un conseil agronomique personnalisé, ce menu analytique complet vise à optimiser les pratiques culturales en permettant à la fois un stockage suffisant et durable du carbone dans le sol et une augmentation de l'activité de dégradation des matières organiques qui conduit à la fourniture des nutriments notamment l'azote. Ce menu sera déployé en systèmes de grandes cultures et de polyculture élevage.

A partir d'une large étude bibliographique et des acquis de projets antérieurs, pas loin de 20 indicateurs différents en lien avec les cycles biogéochimiques du C et de l'azote (N) ont été évalués dans le projet Microbioterre. Il s'agit d'indicateurs en lien avec le stockage C et N (teneurs en azote et carbone organique, fractions de C selon la méthode Rock-EVAL, fractionnement granulométrique de la MO, teneur en carbone labile au KMnO₄), mais également d'indicateurs d'abondance microbienne (quantification du C microbien après fumigation, quantification de l'ADN total, quantifications de l'ADN bactérien et de l'ADN fongique, quantifications de l'ergostérol libre et total), d'activité microbienne (hydrolase de la FDA, β -glucosidase, aminopeptidase, protéase, arylamidase) et d'indicateurs de la transformation du carbone et de l'azote (potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote, azote biologiquement minéralisable (ABM) et azote potentiellement minéralisable (APM)). Ces indicateurs ont été mesurés en réponse à différentes pratiques agricoles: apport de produits résiduels organiques (PRO), implantation de couverts d'interculture, travail du sol, durée de la rotation et systèmes de culture. L'effet de la pratique a été étudié comparativement à un témoin.

Afin de mieux évaluer la variabilité des indicateurs, une analyse de la redondance de ces indicateurs, de leur variabilité spatiale et de leur aptitude discriminante vis-à-vis des pratiques a été réalisée sur 18 sites expérimentaux de moyenne et longue durées (de 6 à 48 ans), incluant différents contextes agropédoclimatiques français. Chaque modalité agronomique des essais retenus a fait l'objet d'un prélèvement de terre sur 0-20 cm de profondeur. Les indicateurs ont été mesurés sur un sol tamisé entre 2 et 6 mm selon les variables étudiées. En complément de ces analyses de terrain, une méta-analyse basée sur 147 articles scientifiques de rang A parus après 2007 a été réalisée.

Dans un objectif de conseil agronomique personnalisé pour atteindre un niveau souhaitable du fonctionnement du sol, en tenant compte du contexte pédoclimatique, de la pratique agricole et des objectifs de l'agriculteur, le projet Microbioterre s'est également intéressé à étudier les

relations entre les indicateurs mesurés et 3 grandes fonctions : recyclage des nutriments, transformation du carbone et structuration du sol. Ces 3 grandes fonctions ont été déclinées en 16 sous-fonctions. Ces relations ont été identifiées à l'issue d'une étude bibliographique et aux dires d'experts lorsque les relations indicateurs / sous-fonctions n'ont pas été rapportées dans la littérature. Pour chaque relation indicateur / sous-fonction documentée dans la bibliographie, le sens de la relation a été noté, un indice de confiance attribué et une équation identifiée lorsque celle-ci est indiquée.

L'analyse des effets des pratiques sur les indicateurs a permis de mettre en évidence un effet prédominant de la pratique apport de PRO, avec un patron de variation commun des indicateurs en réponse à cette pratique. En revanche, la pratique implantation de couverts d'interculture a peu impacté les indicateurs probablement à cause du nombre réduit de modalités et des biomasses peu élevées des couverts (biomasses faibles (< 2 t MS/ha) à moyennes (entre 2 et 4 t MS/ha)). Ces résultats ont été confirmés par ceux de la méta-analyse basée sur 41 et 31 articles pour les PRO et couverts d'interculture respectivement.

Pour l'ensemble de ces pratiques, les indicateurs étudiés ont été retenus sur la base des résultats statistiques et de la prise en compte de différents critères de faisabilité technique et de coûts engendrés par la mesure de chaque indicateur dans l'outil opérationnel de routine. Ainsi seuls 7 indicateurs microbiologiques (biomasse microbienne C, ADNr 18S, protéase, aminopeptidase, arylamidase, ABM, β -glucosidase,) parmi les 14 testés pourraient être ajoutés à l'analyse de routine des sols pour fournir des conseils pertinents aux agriculteurs. Ces indicateurs seraient analysés en plus de 4 indicateurs physico-chimiques (C organique, N total, carbone labile au KMnO_4 et fractionnement granulométrique).

La synthèse des travaux des relations fonctions du sol / indicateurs montre que certaines relations sont encore mal renseignées dans la littérature. Néanmoins, ces travaux montrent qu'une grande majorité des variables retenues sont positivement corrélées aux différentes sous-fonctions. Ce résultat est une première étape pour répondre à l'objectif de l'agriculteur souhaitant optimiser une fonction donnée du sol en lui proposant quels indicateurs mesurer et quel(s) levier(s) agronomique(s) utiliser en fonction des valeurs mesurées de ces indicateurs.

A l'issue de ce projet Microbioterre, des protocoles méthodologiques harmonisés et opérationnels seront mis à la disposition des laboratoires d'analyses intéressés. Il sera également mis à disposition un référentiel d'interprétation des indicateurs en définissant notamment le niveau de chaque indicateur (**Figure 1**). Enfin, le projet proposera un cadre de référence pour aider dans l'interprétation des données des indicateurs mesurés grâce à la mise en place d'une formation et d'un guide d'interprétation à destination des conseillers et des agriculteurs.

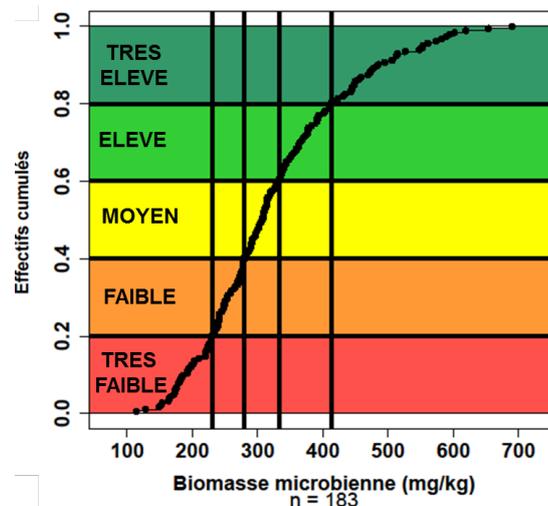


Fig 1: Référentiel d'interprétation du niveau d'un indicateur (*ex* : biomasse microbienne fumigation / extraction), à partir des travaux de l'Université Cornell (2017)

Référence

Cornell University Comprehensive Assessment of Soil Health Laboratory Soil Health Manual Series. January 2017. Schindelbeck, R.R., A.J. Ristow, K.S. Kurtz, L.F. Fennell, H.M. van Es

Remerciements:

Le projet Microbioterre est lauréat de l'appel à projet CASDAR Recherche Technologique de 2016 et a été labellisé par le RMT BOUCLAGE.

IRSTEA pour la réalisation des mesures de pyrolyse Rock-Eval sur les échantillons Microbioterre ;

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt pour son financement CASDAR ;

Partenaires techniques non financés : Chambre d'agriculture d'Alsace, Chambre d'agriculture de Saône et Loire et Chambre d'agriculture du Grand Est ;

Partenaires externes ayant mis à disposition leurs sites d'essais et leurs données : Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, coopérative Dijon Céréales et l'INP Purpan ;

Projet AGRO-ECO SOL pour la mise à disposition de résultats d'analyse et d'échange d'expertise ;

RMT Sols et Territoires et RMT BOUCLAGE pour leur soutien.

Quantification de l'impact global des pratiques agricoles sur les nématodes du sol : une méta-analyse

Jean Trap¹, Jeremy Puissant², Camille Chauvin³, Claude Plassard¹, Eric Blanchart¹, Cécile Villenave²

¹ Eco&Sols, IRD, INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, Montpellier, France

² Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, UMR 5175, CNRS, Montpellier, France

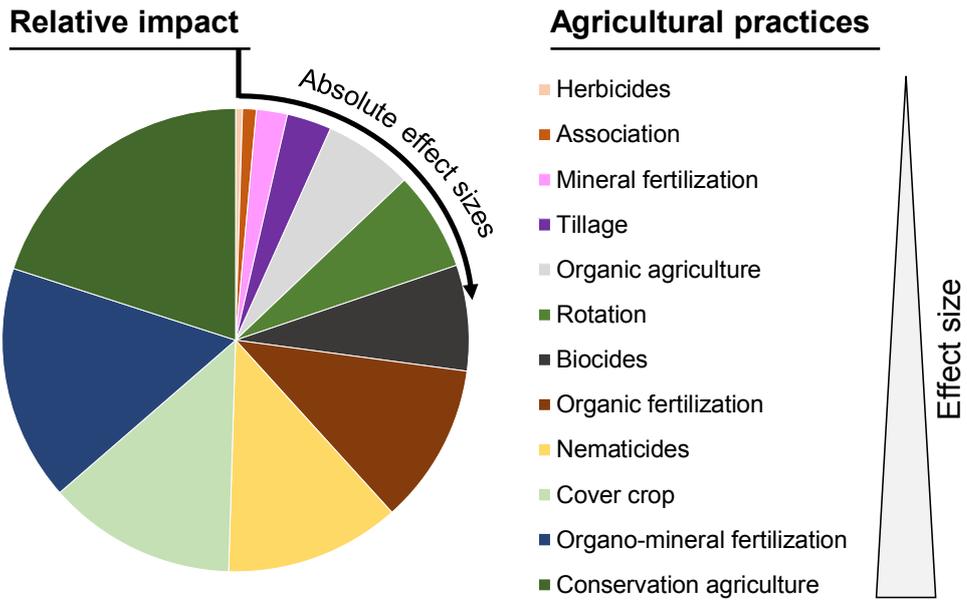
³ ELISOL environnement, ZA des Tourels, 10, avenue du midi, 30111 Congénies, France

Mots-Clés : indicateurs biologiques des sols, fonctions des sols, pratiques agro-écologiques, rotation, biocides, travail du sol, groupes trophique, indices nématofauniques.

Les pratiques agricoles affectent considérablement la biodiversité et les fonctions des sols et modifient les cycles biogéochimiques. L'identification de pratiques agricoles qui assurent une durabilité du fonctionnement du sol est une préoccupation croissante et nécessite une meilleure compréhension et une meilleure quantification de la manière dont l'agriculture affecte le fonctionnement des sols.

Nous avons mené une méta-analyse mondiale, incluant 1338 observations obtenues à partir de 103 publications, pour classer la taille de l'effet des pratiques agricoles sur les nématodes du sol, connus pour être des indicateurs biologiques clés de la santé des sols. En utilisant des indices de nématodes (l'abondance absolue des groupes trophiques, la richesse et la diversité taxonomiques, la structure du réseau trophique basée sur des guildes fonctionnelles), nous avons quantifié comment chaque pratique agricole modifie la taille de la population, les fonctions et les réseaux écologiques au sein de la communauté des nématodes du sol.

Le changement de système de culture (conservation versus conventionnel) a l'effet le plus élevé (+131% en moyenne) sur les paramètres des nématodes comparativement aux différentes pratiques étudiées : gestion de la diversité végétale, apport de pesticides, travail du sol, fertilisation. Les pratiques agricoles ont des impacts variables selon les paramètres nématofauniques, *e.g.* la rotation des cultures influe négativement l'abondance absolue des nématodes phyto-parasites (-47%), la présence d'une culture de couverture influe positivement l'abondance des omnivores-prédateurs (+80%) ou la fertilisation organique influe positivement les bactérivores (+ 13%) et fongivores (+141%). La gestion de la diversité végétale a un effet significatif sur les communautés de nématodes, en particulier en réduisant l'abondance absolue des nématodes phytoparasitaires de 47% lors d'une rotation de plus de 2 ans. Les apports d'intrants chimiques, la monoculture et l'application de pesticides réduisent l'abondance des nématodes, la structure du réseau trophique et favorisent les communautés de nématodes copiotrophes. Les biocides et les nématicides ont également des effets significatifs en réduisant l'abondance, la diversité et la complexité du réseau trophique des nématodes du sol. L'application d'herbicide et l'association végétale n'a pas affecté de manière significative la communauté des nématodes. Notre méta-analyse a révélé que l'effet des pratiques agricoles dépend du temps écoulé depuis la dernière perturbation, de la durée de l'adoption d'une pratique et de l'abondance initiale des nématodes du sol. En fournissant la direction et la taille de la réponse des nématodes du sol aux pratiques agricoles, cette étude facilite la modélisation mondiale de la biodiversité dans des scénarios de changement global.



Hétérogénéité spatiale de la qualité des sols dans un système agroforestier Méditerranéen : comparaison avec un système en monoculture

Esther Guillot¹, Isabelle Bertrand¹, Didier Arnal¹, Josiane Abadie¹, Philippe Hinsinger¹

¹ *Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France*

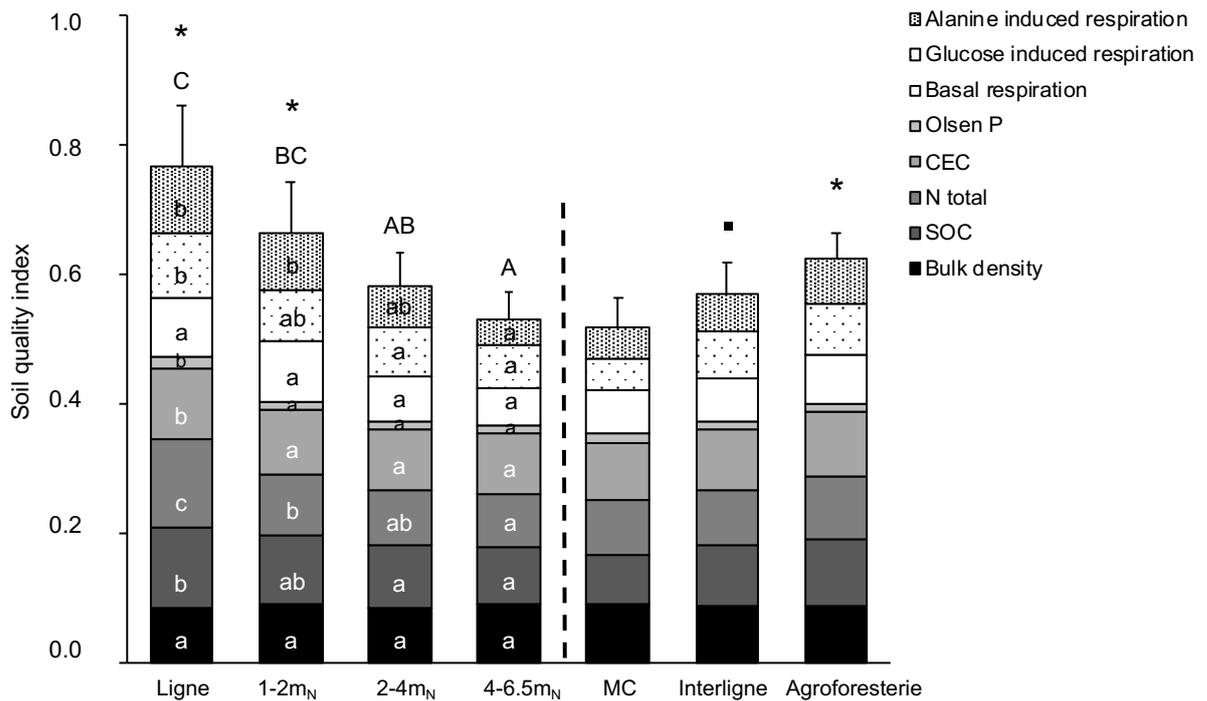
Mots-Clés : Qualité des sols, agroforesterie, indice de qualité du sol, hétérogénéité spatiale

L'utilisation des terres est reconnue comme l'un des principaux facteurs affectant l'amélioration ou la dégradation de la qualité des sols (Lal *et al.*, 2015). Les systèmes agroforestiers sont des agroécosystèmes complexes mis en évidence pour leurs effets positifs sur la qualité des sols, en particulier via le stockage du carbone (Dollinger *et al.*, 2018). Même si un effet global positif de l'agroforesterie sur la qualité des sols a été reconnu, il convient de noter que seule une faible proportion d'études a pris en compte l'hétérogénéité spatiale induite par ces systèmes. L'étendue spatiale sur laquelle les lignes d'arbres et leurs bandes enherbées associées peuvent affecter la qualité du sol dans l'interligne reste à être plus amplement étudiée.

Le but de cette étude était d'évaluer la qualité du sol à l'échelle de la parcelle, sous les lignes arborées et le long de transects perpendiculaires à la ligne arborée et de comparer le système agroforestier au système de monoculture. Cette étude a été réalisée au domaine expérimental de Restinclières (34) sur un système agroforestier de culture intercalaire combinant des noyers hybrides (21 ans) et une culture de pois. Les sols de surfaces ont été échantillonnés sur les lignes arborées, entre 1 et 2m, 2 et 4m et 4 et 6,5 m de la ligne d'arbres dans l'interligne, ainsi que dans une parcelle voisine en monoculture de pois. Des indicateurs physiques, chimiques et microbiologiques de la qualité des sols ont été mesurés au printemps 2016. Ces indicateurs (~ 30) ont ensuite été triés via une approche statistique pour produire un jeu de données minimum, à partir duquel un indice de qualité du sol (SQI) a été construit (Obriot *et al.*, 2016). Un total de 8 indicateurs i.e. la densité apparente, le SOC, le N total, la CEC, le P Olsen, la respiration basale et la respiration induite par le glucose et l'alanine, ont été intégrés dans le SQI.

L'indice de qualité du sol a été calculé pour la parcelle en monoculture et pour chaque position dans la parcelle agroforestière. Après 21 ans d'agroforesterie, les lignes arborées et la bande enherbée permanente ont amélioré le SQI jusqu'à 2 m dans l'interligne cultivée (Figure 1). Des SQI pondérés ont été calculés par rapport à la surface de chaque emplacement pour l'ensemble de la parcelle agroforestière (c.-à-d. ligne arborée + emplacements dans l'interligne) et pour l'ensemble de l'interligne uniquement (c.-à-d. en supprimant la surface « ligne arborée »). Tandis que le SQI pondéré de l'ensemble de l'interligne cultivée montrait une légère augmentation par rapport au SQI de la monoculture (0,57 vs 0,52, $P = 0,08$), celui de la parcelle agroforestière était significativement supérieur de 20% par rapport à celui de la monoculture (0,67 vs 0,52, $P < 0,05$).

Figure 1



Indice de qualité du sol (SQI) basé sur la densité apparente, le SOC, le N total, la capacité d'échange cationique (CEC), le P Olsen, la respiration basale, La respiration induite par le glucose et l'alanine. Les données sont montrées pour la ligne arborée (Ligne), à 1-2 m, 2-4 m et 4-6,5 m de la ligne d'arbres face nord (N), en monoculture (MC), pour l'interligne pondéré (Interligne) et pour la parcelle agroforestière pondérée (Agroforesterie). Les données sont des valeurs moyennes du SQI total + écart type (n = 5). Différentes lettres minuscules indiquent des différences significatives dans les contributions individuelles des indicateurs entre les positions dans la parcelle agroforestière, tandis que différentes lettres majuscules indiquent des différences significatives dans le SQI total, '*' indique une différence significative par rapport à la monoculture ($P < 0,05$) et '.' à $0,05 < P < 0,1$.

Références

- R. Lal, 2015. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 7:5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>.
- J. Dollinger, S. Jose, 2018. Agroforestry for soil health. *Agroforest Syst* 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>.
- F. Obriot, M. Stauffer, Y. Goubard, N. Cheviron, G. Peres, M. Eden, A. Revallier, L. Vieublé-Gonod, S. Houot, 2016. Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 232:165–178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.004>.

Évaluation multicritère de l'effet des cendres de *Miscanthus* × *giganteus* sur la qualité du sol d'un champ de blé

Claire BRAMI^{1,2,4}, Clémentine DENIS², Christopher Nathan LOWE¹, Safya MENASSERI²,
Nathalie CHEVIRON³, Thierry JACQUET⁴, Guénola PERES²

¹ : University of Central Lancashire, Preston, UK cnlowe71@gmail.com,

² : UMR SAS, Institut Agro, INRAE, 35000 Rennes, France

guenola.peres@agrocampus-ouest.fr, safya.menasseri@agrocampus-ouest.fr,
clementine.denis@agrosumpus-ouest.fr

³ : UMR ECOSYS, INRAE, 78026 Versailles nathalie.chevignon@inrae.fr

⁴ : Phytorestore, 53 avenue Philippe Auguste, 75011 Paris, France
thierry.jacquet@phytorestore.com

Mots-Clés : Qualité du sol, *Miscanthus x giganteus*, Évaluation multicritère, Cendres

Introduction

Compte tenu de la croissance des besoins en biomasse et de la nécessité de s'approvisionner de manière durable, la production et l'utilisation de biomasse issue de cultures énergétiques pérennes de graminées devraient augmenter dans les années à venir. En raison de son rendement élevé et de sa récolte annuelle le *Miscanthus* a été identifié comme étant l'une des graminées énergétiques ayant le meilleur potentiel de production de biomasse des régions tempérées (Lewandowski et al., 2003). Le *Miscanthus* est principalement utilisé pour la production d'énergie en Europe, notamment via le processus de combustion qui conduit à la formation de cendres. Les cendres de biomasse ont actuellement le statut de déchets en Europe et à ce titre, elles sont principalement envoyées en centre d'enfouissement (Boulday and Marcovecchio, 2016). En plus d'être coûteux, ce mode d'élimination entraîne une perte de nutriments et de minéraux extraits par le *Miscanthus*. Au regard de leurs teneurs en phosphore, potassium et autres nutriments et de leur potentiel neutralisant, les cendres de *Miscanthus* pourraient être utilisées comme fertilisant ou agent de chaulage en agriculture (Lanzerstorfer, 2019). A ce jour, très peu de travaux portent sur les cendres de *Miscanthus* (Lanzerstorfer, 2017) et aucune étude n'évalue leur influence sur la qualité du sol via une évaluation conjointe des composantes chimique, biologique et physique (Silva et al., 2019).

L'objectif de cette étude, qui s'inscrit dans le projet plus large Biomasse For the Future (BFF, Projet ANR 11-BTBR-0006), est de tester si l'apport de cendres de *Miscanthus* × *giganteus* appliquées à des doses réalistes dans un contexte de fertilisation ou en remplacement du chaulage (1) n'a pas d'effet négatif sur la qualité d'un sol cultivé, qualité appréhendée par une approche multicritère associant les dimensions biologique, chimique, physique et agronomique et (2) permet un apport de P et de K ainsi qu'une augmentation du pH, conduisant à une amélioration de la qualité du sol dans certains contextes agronomiques (carence, sol acide...).

Méthodes

L'étude a été réalisée sur le site de la Bioferme (La Brosse-Montceaux, France) sur un sol non-contaminé de type Cambisol avec une texture de type limon silto-argileux (argile : 27%, limon : 56%, sable : 17%). Différents traitements ont été étudiés (0, 1, 2.5 et 5 t ha⁻¹) correspondant à des doses croissantes de cendres de *Miscanthus* cultivé sur un site non contaminé et épandus avant les semis sur une culture de blé. La composition des cendres a été analysée. Les propriétés chimiques

(pH, C_{org} , N_{tot} , C/N, éléments traces métalliques), biologiques (biomasse microbienne, activités enzymatiques, communautés lombriciennes) et physiques (stabilité structurale, densité apparente) du sol ont été analysées à la suite de deux campagnes d'échantillonnage ayant eu lieu cinq et douze mois après les apports de cendres (respectivement en mars et octobre 2019). Le blé a été récolté neuf mois après l'épandage des cendres et la quantité (rendement en grains) et la qualité des grains (teneurs en protéines) ont été évaluées.

Les propriétés du sol ont été agrégées afin de proposer un indice de qualité du sol permettant d'avoir une vision intégrée. Un jeu de données minimal de 33 paramètres a été sélectionné en se basant sur l'opinion d'un réseau d'experts, puis les paramètres du sol ont été classés dans cinq catégories : (1) la composante biologique, (2) la composante agronomique, (3) les ETM totaux, (4) les ETM disponibles et (5) la composante physique. Un score compris entre 0 et 1 a été attribué à chaque catégorie ce qui a permis de représenter les résultats sous forme de diagramme en radar (Figure 1).

Résultats et discussions

Les résultats ont mis en évidence l'absence d'effet délétère des cendres sur la qualité du sol et sur le rendement en blé.

De plus, une augmentation de pH de 0.2 point ($p = 0.0046$) a été enregistrée 5 mois après l'épandage des cendres de *Miscanthus*, dans le traitement 5 t ha^{-1} (8.3 ± 0.0) par rapport au traitement contrôle (8.1 ± 0.0). De la même manière, 5 mois après l'épandage des cendres, les teneurs en P_2O_5 disponible (extraction Olsen) étaient significativement supérieures au contrôle dans les traitements 2.5 ($p = 0.0018$) et 5 t ha^{-1} ($p < 0.0001$) de 40% et 60% respectivement. Un accroissement de la concentration en potassium a également été enregistré avec l'apport de cendres et cet effet était toujours visible après 12 mois. En effet, 5 mois après l'épandage des cendres, la teneur en K_2O disponible était significativement supérieure au contrôle dans les traitements 2.5 ($p = 0.0094$) et 5 t ha^{-1} ($p < 0.0001$) de 36% et 70% respectivement et 12 mois après l'épandage des cendres, la teneur en K_2O disponible était toujours significativement supérieure au contrôle ($p = 0.0025$) de 40% dans le traitement 5 t ha^{-1} . Ces résultats sont cohérents avec le fait que la cendre de *Miscanthus* utilisée était alcaline (pH = 11.8) et est constituée de 5% et 18% de phosphore et de potassium respectivement.

Concernant les potentiels d'activités enzymatiques, 12 mois après l'épandage des cendres les résultats de β -glucosidase et de phosphatase étaient plus élevés dans le traitement 1 t ha^{-1} que dans le traitement contrôle de 23% ($p < 0.001$) et 14% ($p = 0.0022$) respectivement. À l'inverse, aucun effet des cendres n'a été mis en avant sur la biomasse microbienne et sur les communautés lombriciennes. Les apports de cendres n'empêchent donc pas le compartiment biologique du sol de contribuer aux services écosystémiques qui lui sont associés, renforçant la possibilité d'effectuer des apports de cendres sans risque.

Les résultats ont révélé une amélioration de la stabilité structurale après réhumectation lente avec un diamètre pondéré moyen des agrégats (MWD) supérieur de 31% ($p = 0.0047$) et de 21 % ($p = 0.0397$) dans le traitement 5 t ha^{-1} par rapport au contrôle 5 et 12 mois après l'apport de cendre respectivement. Cet effet des cendres est probablement dû à (1) la production de polysaccharides extracellulaires par les communautés microbiennes suite à un stress osmotique et/ou (2) aux apports d'électrolytes, tels que le calcium et le magnésium, favorisant la floculation des argiles.

L'agrégation des résultats sous forme d'un indicateur de la qualité du sol (Figure 1) a mis en évidence une amélioration de la composante physique du sol avec le traitement le plus élevé (5 t ha^{-1}) jusqu'à douze mois après l'apport de cendres. En outre, le traitement 1 t ha^{-1} était celui qui présentait les meilleurs résultats concernant les composantes agronomiques, de métaux totaux, de métaux échangeables ainsi que la composante biologique du sol, douze mois après l'apport de cendres.

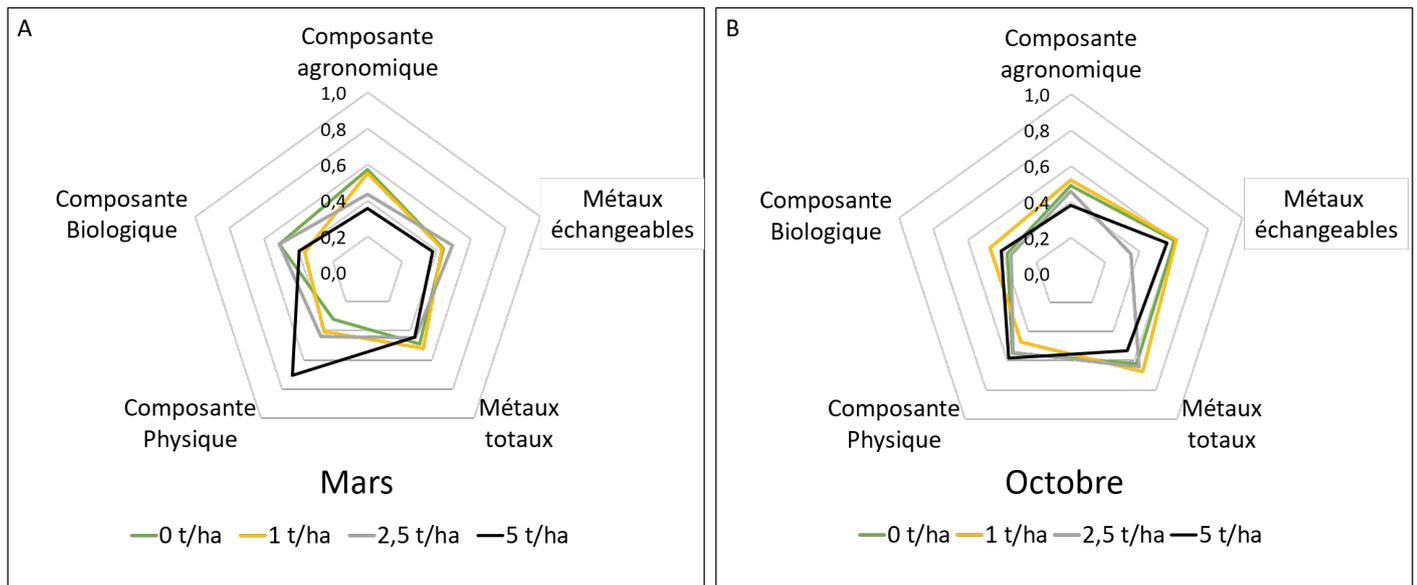


Figure 4. Diagrammes en radar des résultats agrégés des cinq catégories de la qualité du sol étudiées, 5 mois (A mars) et 12 mois (B - octobre), après l'épandage des traitements (0, 1, 2.5 et 5 t ha⁻¹) de cendres de *Miscanthus × giganteus*.

Conclusions et perspectives

Ces résultats suggèrent que la dose de cendres à apporter dépend de la composante du sol que l'on souhaite améliorer, dans la mesure où elle n'a pas d'effet négatif suffisamment important sur les autres composantes du sol. Cependant, l'effet des cendres étant dépendant du milieu récepteur, d'autres études sont nécessaires afin de confirmer ces effets sur d'autres types de sols (texture et pH différents) et de vérifier l'innocuité des cendres suite à des apports répétés. Des études devraient aussi être menées sur les capacités fertilisantes des cendres sur des cultures en sols carencés en phosphore et potassium et/ou sur sol acide.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Kevin Hoeffner, Marc Roucaute, Annegret Nicolai, Clotilde Blancfène, Lou Lerner, Yannick Benard, Laurence Carteaux, Sylvain Busnot et Gaëlle Hamelin pour leur aide lors des campagnes d'échantillonnages et lors de l'analyse des échantillons. Un grand merci aussi à Didier Larida pour son aide dans la gestion de la zone expérimentale ainsi qu'à Jacques Vaillant pour la fourniture des cendres de *Miscanthus*.

Ce projet a été financé par l'ANR (référence projet : 11-BTBR-0006) et par une bourse CIFRE (2017/0097).

Références

- Boulday D, Marcovecchio F. RECORD. Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse. Revue des gisements et des procédés associés. n°14-0913/1A, 2016, pp. 91 pages.
- Lanzerstorfer C. Chemical composition and properties of ashes from combustion plants using *Miscanthus* as fuel. J Environ Sci (China) 2017; 54: 178-183.

- Lanzerstorfer C. Combustion of miscanthus: Composition of the ash by particle size. *Energies* 2019; 12: 178.
- Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and bioenergy* 2003; 25: 335-361.
- Silva FC, Cruz NC, Tarelho LAC, Rodrigues SM. Use of biomass ash-based materials as soil fertilisers: Critical review of the existing regulatory framework. *Journal of cleaner production* 2019; 214: 112-124.

Indicateur de santé des sols pour monitorer la transition

Antoine Brasset

51-53 rue de l'Alcazar 59800 Lille

Mots-Clés : indicateurs simples, open-source, agriculture régénératrice, fertilité des sols

Depuis 2018, le **programme Sols Vivants** vise à accélérer la transition vers l'agriculture régénérative les différents acteurs des filières. D'abord à une échelle pilote, le programme se déploie aujourd'hui dans les Hauts-de-France et d'autres territoire comme le Grand-Est. Se déployement est rendu possible grâce à l'implication forte de nombreux acteurs comme les filières agroalimentaires, des partenaires du monde agricole, économique, scientifique, technique et institutionnel.

L'action du collectif s'articule autour de trois piliers, indissociables les uns des autres :

- la **mesure** de la « santé » des sols grâce à la création et au déploiement d'un indicateur open source et gratuit de fertilité du sol, véritable boussole de l'action,
- l'**accompagnement** de l'agriculteur dans la transformation de ses pratiques via des formations, de l'accompagnement terrain,
- l'**incitation** financière, car la transition représente un investissement important de l'agriculteur en termes de moyens matériels et de montée en compétences. Une meilleure performance environnementale et climatique doit aussi être rémunérée par la société.

Concernant la mesure, le programme s'est entouré d'experts : nous avons développé un indicateur de santé du sol dont l'objectif est de servir de base pour que les agriculteurs pilotent la santé/fertilité de leur sol. Par ailleurs nous avons travaillé sur la méthodologie de quantification et d'estimation du stock de carbone dans les sols.

Depuis les débuts de l'initiative Sols Vivants, il est apparu essentiel de définir ce qu'est la santé des sols. En effet, un sol en bonne santé, de bonne qualité va pouvoir assurer ses fonctions : support des plantes, filtration de l'eau, stockage de carbone etc. Mais cette notion est en réalité complexe et relève d'une association de paramètres physiques, chimiques et biologique. Sols vivants c'est donc entouré d'un comité scientifique pour avancer sur la mesure de la qualité des sols et du stockage de carbone.

En décembre 2020, nous sommes parvenus à la **définition d'un premier indicateur de santé des sols**. Le tableau de bord proposé par le programme « Sols Vivants » a pour objectif de proposer un indicateur de résultat, simple, peu coûteux, validé par la recherche et les utilisateurs sur le terrain.

L'**indicateur de fertilité des sols "Sols Vivants"** vise à obtenir une vision globale de la fertilité du sol pour l'agriculteur et les conseillers agricoles. Pour le calcul de l'indicateur une analyse de terre ainsi qu'un test bêche (VESS + bioturbation) suffisent. L'indicateur fonctionne sur le principe du "nutri-score" il classe les sols en 5 catégories (A, B, C, D, E), A étant la meilleur classe et E la plus mauvaise. À travers cet indicateur l'agriculteur peut évaluer si ses pratiques ont un effet bénéfique ou délétère sur son sol.

C'est un indicateur composite incluant des sous-indicateurs apportant chacun un aperçu d'une des fertilités du sols (physique, chimique ou biologique). Dans les différents sous indicateurs utilisés on retrouve le pH, le ratio MO/Argile, le test VESS, l'évaluation visuel de la bioturbation, le C/N, le taux de carbonate de calcium. Pour chacun des sous-indicateurs on obtient une note de 0 à 3,

plus la note est élevée plus l'indicateur est bon. On réalise la moyenne des notes obtenues pour l'ensemble des indicateurs ce qui nous donne notre classe « Sols Vivants ».

On obtient alors une **note globale de la fertilité du sol**, on peut ensuite revenir au sous-indicateur qui la compose pour comprendre la note et identifier les éléments à améliorer.

C'est un outil de pilotage pour l'agriculteur qui peut, avec ce diagnostic mettre en place des pratiques et suivre l'évolution de la qualité du sol au cours du temps.

L'indicateur de résultat, bien que validé dans l'approche, est **évolutif** : des campagnes terrain menées entre février et mai 2021 permettront d'évaluer ces indicateurs sous différents contextes pédoclimatiques et de les adapter si besoin.

Un tableau de bord pour suivre la transition vers l'agriculture régénérative

Le programme Sols vivant travail également à l'élaboration d'un tableau de bord d'indicateur permettant de suivre la transition des agriculteurs vers l'agriculture régénérative.

Ce tableau de bord d'indicateur se veut orienter résultats, l'objectifs n'est pas de juger l'agriculteur sur ses pratiques mais bien sur les résultats qu'il obtient. On évalue la performance des pratiques mises en œuvre.

Le tableau de bord repose sur les 3 grands piliers de l'agriculture de conservation ou agriculture régénératrice, à savoir, la réduction du travail du sol, la couverture maximale et la diversification des rotations. L'approche du programme Sols Vivants, ce veut inclusive et non dogmatique, c'est pourquoi la réduction du travail du sol est évalué indirectement.

1. **Le taux de couverture vivante des sols.** Cet indicateur vise à caractériser le nombre de jours dans l'année ou le sol est couvert par une plante vivante ayant un impact sur le sol. Le taux de couverture est calculé à partir du NDV issue des données satellites Sentinel-2. Cet indicateur est associé à un objectif de durée de couverture et de qualité. Si le couvert n'est pas suffisamment développé il n'est pas pris en compte. Pour estomper les effets années et les effets liés aux cultures, nous moyennons cette durée à l'échelle de la rotation.
2. **L'évolution de la dynamique du stock de carbone au cours du temps.** L'objectif est de modéliser l'évolution des stocks de carbone avec l'outil SIMEOS-AMG en utilisant les données de pratiques de l'agriculteurs sur les 5 dernières années. En comparant les différentes simulations effectuées au fur et à mesure des années l'objectif est d'observer une amélioration de la dynamique du stock de carbone.

Par ailleurs, Sols Vivants a également participé au développement d'une méthode pour quantifier le stock du carbone dans les sols, et effectuer des comparaisons de stocks pertinentes dans le temps (principe des stocks à masses équivalente). Cette mesure n'est pas triviale, mais est primordiale pour réaliser des simulations d'évolution des stocks de carbones dans le temps qui soient juste. La méthode doit donc être, représentative de la parcelle, comparable après plusieurs années et permettre de mettre en évidence des changements. En partenariat avec Earthworm, AgroTransfert RT, l'INRAE et la HES SO, un article scientifique a été soumis à la revue Etude et Gestion des Sols.

3. **La diversité des familles cultivées (DFC).** Le DFC est un indicateur issu de la liste des concepteurs de la méthode MASC. Le DFC dans une rotation peut être calculée grâce à l'indice de diversité de Simpson rendant compte à la fois du nombre de familles et de leur équitabilité (plus la répartition des cultures au sein de chaque famille est similaire, plus l'équitabilité est élevée) (Angevin et al., 2011).

La définition et la mise en œuvre de ces différents indicateurs découlent d'un travail de R&D avec les membres du comité scientifique. Une première version est éprouvée lors de cette campagne et nous souhaitons la présenter lors de la journée des sols.

La gestion durable des sols peut-elle contribuer à la neutralité carbone d'une entité industrielle gestionnaire d'un domaine foncier ? Cas de l'aéroport d'Abidjan en Côte d'Ivoire.

Dominique Masse¹, Sofyan Martin², Frédéric Bourdillat³, Mohamed Kadiri⁴, Aly Ouattara⁵

1 IRD, UMR ECO&SOLS (IRD, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Université de Montpellier). dominique.masse@ird.fr

2 EGIS. Sofyan.MARTIN@egis.fr

3 EGIS. Frederic.BOURDILLAT@egis.fr

4 EGIS. Mohamed-Lamine.KADIRI@egis.fr

5 AERIA. Aéroport International Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, République de Côte d'Ivoire. ouattara.aly@aeria-ci.com

Mots-Clés : neutralité carbone, carbone du sol, co-bénéfices environnemental et social.

La gestion durable des sols et la séquestration du carbone dans les sols s'affichent en bonne place dans les enjeux de développement agricole pour les organisations publiques nationales et internationales. Ces questions intéressent également de plus en plus les entreprises privées qui s'engagent dans une réduction de leur empreinte écologique, notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. Toutes ces organisations engagées dans une transition écologique ont besoins d'outils d'évaluation et de suivi pour identifier et évaluer des solutions pour améliorer la séquestration du carbone dans les sols étudiés, tout en s'assurant de co-bénéfices sociaux, économiques (génération/maintien d'emploi en lien avec le sol), et environnementaux (respect de la biodiversité des sols et plus largement des écosystèmes qui s'y développent) pour le territoire dans lesquels ils sont implantés ou dont ils ont la responsabilité dans leur gestion.

La société EGIS et sa filiale AERIA qui exploite l'aéroport Félix-Houphouët-Boigny d'Abidjan sont engagés dans une démarche de neutralité carbone en ce qui concerne l'activité aéroportuaire. Nous avons testé avec des méthodes d'évaluation rapide au sein d'une approche opérationnelle d'aide à la gestion agile multi-acteurs du carbone des sols et services écosystémiques. Ce développement s'inscrit à terme dans un projet de Recherche et développement pour un déploiement commercial piloté par la société EGIS.

Cette communication présente les premiers résultats obtenus. L'objectif de cette preuve de concept était de vérifier dans quelles mesures la société AERIA, exploitant la plateforme aéroportuaire d'Abidjan pouvait réduire son bilan carbone via une gestion durable de son domaine foncier.

L'Etat Ivoirien a concédé environ 1600 ha de terres à la société AERIA. Un tiers de cette surface est entouré par un mur. Dans cette enceinte sécurisée se trouvent les pistes d'atterrissage et de décollage, les pistes de roulement des avions entourés de prairies herbacées. On y trouve également l'aérogare et tous les bâtiments techniques et administratifs liés à l'activité aéroportuaire. Au-delà du mur, se trouvent divers bâtiments de sociétés dont l'activité est en lien avec l'aéroport (douanes, sociétés de transport, sociétés agroalimentaires, divers bâtiments administratifs, etc.) entourés d'espaces verts. On y trouve également une zone de production maraîchère, des zones d'habitation précaires, et une zone urbaine en place depuis de nombreuses années. L'aéroport est situé entre océan et lagune. En bordure de lagune, des reliques de mangroves très dégradées restent visibles.

Après avoir cartographié les sols sur la base d'études pédologiques anciennes et de visites sur le terrain, des estimations de teneurs en carbone des sols et de stocks de carbone des sols ont été

réalisés. Suite à cela nous avons construit différents scénarios qui permettraient d'orienter certains flux de carbone vers les sols de l'aéroport ou de réhabilitation de terres dégradées permettant de reconstituer des stocks de carbone dans les sols. L'identification des scénarios s'est faite avec différents acteurs impliqués par la gestion des terres (entretien des espaces verts), par la gestion des effluents organiques (gestion des déchets fermentescibles produits au sein de l'aéroport et des entreprises connexes), les services de management et de direction, les services en charge de la sécurité et de l'exploitation des pistes aéroportuaires. Parallèlement les coûts sociaux et financiers de mise en œuvre des différents scénarios ont été testés.

Quatre scénarios ont été proposés. Ils concernent la végétalisation des sols nus et l'augmentation de la productivité des prairies qui entourent les pistes, la mise en place de périmètres maraichers avec des bonnes pratiques agricoles dans les zones qui entourent l'enceinte aéroportuaire, la réhabilitation de la mangrove en bord de lagune et jouxtant l'aéroport, enfin une récupération des déchets organiques et leur compostage qui produits par l'aéroport ainsi que par les unités de production des repas servis dans les avions et qui se trouvent sur le site aéroportuaire. Une estimation des gains potentiels de stock de carbone calculé à partir des scénarii identifiés s'élève à 8595 T C soit de l'ordre de + 52% par rapport au stock actuel. Les scénarii proposés permettent théoriquement une réduction du bilan carbone de l'ordre de 1573 T CO₂eq/an correspondant à 33% du volume actuellement compensé par AERIA.

**Un numéro spécial de la revue *Etude et Gestion des Sols* :
« Fonctions des sols et services écosystémiques »**

Eglin T.¹, Cousin I², Walter C.³

1 ADEME, Direction Productions et Energies Durables, Angers, France.

INRAE Orléans, UR SOLS Science du Sol, Centre Val de Loire, France.

3 Institut Agro, INRAE, UMR SAS, 35000 Rennes, France

Mots-Clés : Fonctions des sols, services écosystémiques, concepts, indicateurs, évaluation, retours d'expérience

Depuis presque deux décennies, les concepts de fonctions des sols et de services rendus (directement par le sol ou via leur contribution au fonctionnement des écosystèmes) sont mis en avant dans la littérature scientifique et dans les politiques publiques comme une approche pertinente pour sensibiliser les acteurs de la gestion des sols et les aider dans leurs prises de décision. Ils ont été développés pour souligner l'importance des sols et éviter qu'ils soient ignorés si l'on se plaçait uniquement à l'échelle plus globale de l'écosystème.

De nombreux travaux de recherches fondamentale et appliquée ont mobilisé ces notions de fonction et de service, en particulier dans les domaines de l'agriculture, de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, mais selon des approches et des terminologies très hétérogènes.

Ce numéro spécial de la revue *Etude et Gestion des Sols* se propose d'illustrer les avancées dans ces différents domaines d'application en s'appuyant sur des travaux récents menés par des équipes françaises. Les articles rassemblés dans cet ouvrage présentent des réflexions conceptuelles et méthodologiques, des propositions d'indicateurs des fonctions et des services auxquels contribuent les sols, la mise au point de méthodologies d'évaluation et des exemples d'opérationnalisation de ces méthodes. Une diversité d'écosystèmes avec une forte intervention de l'homme est considérée, notamment les milieux urbains, les agro-écosystèmes et les écosystèmes forestiers.

Téléchargement :

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/>

Influence du changement climatique sur la dynamique des pollutions organiques dans les sols alpins

MARCHAL, L. ¹, GATEUILLE, D. ¹, NAFFRECHOUX, E. ¹, POULENARD, J. ¹

¹ Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire EDYTEM

Mots-Clés : Sols de montagne – HAP – Toposéquences – Changement climatique

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des polluants organiques principalement libérés dans l'atmosphère par la combustion incomplète des matières organiques, dont les origines peuvent être diverses (trafic routier et chauffage domestique notamment). Ce sont des polluants particulièrement toxiques, à la fois pour l'être humain et pour l'environnement, dont les effets cancérigènes, mutagènes et/ou reprotoxiques sont déjà avérés pour 8 d'entre eux (Gateuille, 2013). Les propriétés physico-chimiques des HAP sont des facteurs clefs impactant leur transport et leur dépôt (à plus ou moins grandes distances du point de source) sur les sols et la végétation. Une caractéristique notable de ces polluants est leur forte tendance à se fixer sur les matières organiques des sols (MOS). Selon Sehili et Lammel (2007), les sols stockeraient plus de 2/3 des HAP présents dans l'environnement, leur conférant un rôle essentiel dans le piégeage et, *in fine*, la protection des écosystèmes aquatiques.

En parallèle de ces processus, le changement climatique actuel a un impact particulièrement notable sur les zones de montagnes. Dans les Alpes en particulier, les températures minimales ont déjà augmenté de 2°C au cours du 20^{ème} siècle (Djukic *et al.*, 2010). Ces changements de températures engendrent des modifications de la composition et des propriétés des sols, impliquant notamment une perte en carbone organique (Leifeld *et al.*, 2009).

Par voie de conséquence, cette perte en carbone conduit à des changements dans la capacité des sols à piéger les HAP, et pourrait entraîner une remobilisation des stocks de HAP constitués depuis des décennies. C'est un problème majeur puisque les HAP sont déjà responsables de la majorité des cas de non-respects des normes du bon état chimique de l'eau, fixées par la directive cadre européenne 2000/60/CE.

Mes travaux portent sur les stocks de HAP sur des toposéquences des Alpes Françaises (Vercors, Chartreuse, Bauges, Lautaret), mises en place dans le cadre du projet ORCHAMP (Observatoire des Relations Climat-Homme-milieu Agro-sylvo-pastoraux du Massif alpin : <https://orchamp.osug.fr/>). Sur 18 placettes (150 échantillons), issues de 3 toposéquences différentes, les teneurs en polluants sont mises en lien avec des facteurs externes (distances aux villes, distances aux routes, altitudes) et des facteurs internes (teneurs en carbone organique, nature des matières organiques, granulométrie, etc.) dans le but d'identifier les paramètres impactant la constitution de ces stocks avant leur possible remobilisation.

Les premières quantifications en HAP des sols étudiés permettent d'observer des différences en termes de concentrations, selon les toposéquence. Ces concentrations sont également mises en lien avec certains facteurs externes, comme l'altitude, l'exposition ou la distance aux sources. Enfin, des calculs de ratios de HAP issus de la littérature mettent en évidence certaines signatures des toposéquences.

Références

- Djukic, I., Zehetner, F., Tatzber, M., Gerzabek, M.H., 2010. Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 30–38. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900027>
- Gateuille, D., Evrard, O., Lefevre, I., Moreau-Guigon, E., Alliot, F., Chevreuil, M., Mouchel, J.-M., 2014. Mass balance and decontamination times of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in rural nested catchments of an early industrialized region (Seine River basin, France). *Sci. Total Environ.* 470–471, 608–617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.009>
- Gateuille, D., 2013. Rémanence et transferts des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans le bassin amont de la Seine. Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE
- Leifeld, J., Zimmermann, M., Fuhrer, J., Conen, F., 2009. Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps. *Glob. Change Biol.* 15, 668–679. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01782.x>
- Sehili, A.M., Lammel, G., 2007. Global fate and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from Europe and Russia. *Atmos. Environ.* 41, 8301–8315. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.050>

Novasol Experts, un bureau d'étude pour une expertise innovante de la qualité écologique des sols

Battle Karimi¹, Charles Guillard¹

¹ Novasol Experts, Maison Régionale de l'Innovation, 21000 Dijon

Mots-Clés : Ecologie microbienne, Sols, Expertise, Agroécologie, Ville durable

Les organismes des sols (microorganismes, nématodes, arthropodes, vers de terre) assurent de nombreuses fonctions à la base de la fertilité physique, chimique et biologique des sols : stabilité structurale du sol, décomposition de la matière organique, contribution aux cycles des éléments majeurs comme le carbone, l'azote et le phosphore, facilitation des flux de nutriments disponibles pour la croissance des plantes mais aussi la dépollution et le stockage du carbone. Ce patrimoine biologique est également le garant de la capacité de résilience des sols et de la durabilité des usages (agricoles, urbains et industriels) dans un contexte de changements globaux. Néanmoins, il peut être altéré ou à l'inverse stimulé par les pratiques relevant de l'agriculture, de l'urbanisation ou des activités industrielles. Ces pratiques doivent donc être raisonnées en fonction de leur impact et de la vulnérabilité biologique naturelle de chaque sol. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une expertise opérationnelle pour juger la qualité écologique d'un sol afin d'évaluer l'impact des pratiques associées à son usage.

Dans ce contexte, Novasol Experts propose une évaluation innovante de la qualité écologique des sols. Cette dernière repose sur une expertise et des outils développés en écologie microbienne des sols et en agroécologie au sein de l'institut de recherche public INRAE. Sa mission est d'accompagner de façon opérationnelle les professionnels dans leur volonté de mieux connaître leur sol et l'impact environnemental de leurs activités dans un contexte de transition agroécologique et de développement des villes durables. Novasol Experts répond à ces besoins en apportant son expertise scientifique par une offre de services complète.

L'analyse des besoins est la première étape, primordiale pour identifier les enjeux de chaque projet. Elle permet au bureau d'étude d'élaborer avec le client la stratégie technique et scientifique la plus adaptée en fonction de ses objectifs et des contraintes du site.

Vient ensuite l'élaboration de la stratégie d'étude, étape-clé pour garantir l'acquisition de résultats robustes indispensables à une évaluation objective de la qualité écologique des sols. À ce niveau, Novasol Experts engage son expertise et son expérience en conduite de projet pour concevoir et mettre en œuvre des stratégies d'étude et des dispositifs expérimentaux répondant le plus justement aux problématiques des acteurs de terrain dans les contextes agricole, industriel ou urbain. Le bureau d'étude met en adéquation les bioindicateurs à mobiliser et l'échantillonnage à déployer avec les besoins exprimés, le type de communication envisagé et le niveau de formation et d'information des professionnels usagers des sols.

Fort de son expertise, le bureau d'étude peut également accompagner les professionnels dans la réflexion, la conception et la mise en place de projets de recherche et de développement, comme par exemple dans le cas de reconstruction/réhabilitation de sols en milieu urbain, d'évaluation de l'impact de nouvelles pratiques (pesticides, méthodes de désherbage, digestats de méthanisation) ou de nouveaux usages agricoles (conversion jachère-vignes ou cultures-prairies par exemple) sur la qualité écologique des sols.

Enfin Novasol Experts propose une offre de formation à destination des professionnels sur des thématiques en lien avec le sol, la biodiversité et l'agroécologie qui peuvent se tenir sous forme d'atelier de restitution de résultats ou de journées scientifiques et/ou techniques. L'expérience du bureau d'étude en communication et vulgarisation scientifique est un atout pour aider les professionnels à mieux appréhender les sols et leur biodiversité, pour les accompagner dans leur stratégie de communication sur la qualité écologique de leurs sols, à l'échelle nationale comme

internationale. Son ancrage dans la recherche lui permet de proposer des services toujours actualisés avec les dernières avancées scientifiques dans son domaine de compétence.

Les services et l'expertise de Novasol Experts s'adressent aux aménageurs territoriaux dans le cas de plans de conversion d'usage ou de réhabilitation de sols, aux propriétaires et gestionnaires de terres agricoles ou encore aux gestionnaires de sites industriels et de friches pollués, qui souhaitent intégrer la qualité écologique des sols à leurs projets pour une stratégie foncière durable.

La mise en œuvre de l'expertise de Novasol Experts sera présentée au travers de 3 études de cas en contexte agricole et urbain.

Les membranes échangeuses d'ions : un indicateur de qualité des sols au service de la pédologie de terrain

RIGOU Laurent¹, DUBERTRAND Etienne²

¹ASUP, 65690 ANGOS (l.rigou-asup@agretpy.fr ou l.rigou@asup-territoires.com)

²Université de Pau et des Pays de l'Adour, Avenue de l'Université, BP 1155 64013 PAU CEDEX

Mots-Clés : membrane échangeuse d'ions, qualité du sol, nitrate, Aire d'Alimentation de Captage, diagnostic pédologique.

Biofunctool® est présenté par ses auteurs, l'IRD et le CIRAD (Brauman *et al.* 2020), comme une démarche d'évaluation de la qualité des sols, composée d'un ensemble d'indicateurs. Cette démarche, référencée par l'ADEME (Calvaruso *et al.* 2019), présente la particularité d'aborder transversalement le fonctionnement de plusieurs compartiments du sol.

Mais au-delà de l'intérêt que représente la fourniture d'indicateurs qualifiés a priori de « low-tech », c'est aussi la possibilité de défricher des hypothèses de fonctionnement des sols, d'optimiser la phase d'analyses de terres en laboratoire ou encore de fournir des éléments de comparaison dans un référentiel, qui est séduisante. Ce sont les raisons pour lesquelles nous avons choisi d'expérimenter cet ensemble d'indicateurs comme outil complémentaire du diagnostic pédologique « classique », que ce soit en cartographie des sols ou en accompagnement agronomique. En effet, si certains des indicateurs déployés dans cette démarche récente sont issus d'une méthodologie normée et bien référencée, d'autres présentent un caractère plus original qu'il nous a semblé important de mieux comprendre pour en faciliter l'appropriation.

C'est le cas notamment de l'approche qualifiée de « dynamique des nutriments dans le sol » qui utilise des membranes échangeuses d'ions MEI ; nous avons ainsi mis en œuvre un ensemble d'expériences destinées à mieux comprendre le concept et le fonctionnement de cette approche, mais aussi à évaluer plus strictement son référencement en termes de qualité du protocole.

Les MEI ont déjà été utilisées en physico-chimie du sol car elles mimeraient certaines actions d'une racine (Le Cadre *et al.* 2018) et fourniraient donc une première évaluation in situ des mécanismes de transfert d'ions entre le sol et la racine. C'est une estimation qui pourrait être particulièrement précieuse dans le cadre de la connaissance des transferts d'azote inorganique dans le sol (Duran *et al.* 2013), notamment dans les aires d'alimentation de captage confrontées à la problématique du transfert de nitrate dans les nappes.

Pour gagner en efficacité et pertinence, il apparaît toutefois que la mise en œuvre de ces MEI dans les horizons du sol bénéficie largement du diagnostic que le pédologue peut faire sur le terrain d'un certain nombre de paramètres, tels que l'agencement des horizons, leur structure, leur porosité, leur activité biologique etc.

Nous testons alors la possibilité de moduler l'usage de ces MEI (modalités d'installation, durée de saturation, répétitions) en fonction de ce diagnostic pédologique préalable ; en retour, nous attendons de cet indicateur et de la démarche qu'ils nous permettent de valider ou non certaines hypothèses de fonctionnement des sols, fonctionnement qu'un diagnostic avec les outils plus habituels de la pédologie n'appréhende pas aisément. L'Aire d'Alimentation de Captage d'Oursbelille –(65) est le territoire où nous testons cette démarche et ces expérimentations pour consolider les scénarios envisagés de transition agricole (SIAEPTN 2018). Nous présentons ici la démarche générale adoptée et les premiers résultats de ces expérimentations.

Les auteurs souhaitent remercier Jean Luc Lavigne et Béatrice Place du SMAEP Tarbes Nord pour leur soutien, Maïté Bueno de l'UPPA (64) et Mathieu Sébilo de l'IPREM (64) pour leur appui méthodologique et l'accès aux laboratoires d'analyse.

Brauman A. et Thoumazeau A. 2020 – Biofunctool ® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol, Etude et Gestion des Sols, 27, 289-303.

Calvaruso C., Blanchart A, Bertin S. 2019 – Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80p (ADEME).

Duran J., Delgado-Baquerizo M., Rodriguez A., Covelo F., Gallardo A. 2013 – Ionic exchange membranes (IEMs) : au good indicator of soil inorganic N production, Soil Biology & Biochemistry 57, 964-968.

SIAEP Tarbes Nord 2018 – Un territoire en action pour la qualité de l'eau : transformation de contraintes en opportunités, 60p.

Effet de l'élévation de la concentration atmosphérique en CO₂ sur les communautés de nématodes du sol : conséquence sur la nutrition de la tomate et du blé dur.

Margot Brondani¹, Louis Mareschal¹, Claude Plassard¹, Jean Trap¹

¹ Eco&Sols, IRD, INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, Montpellier, France

Mots-Clés : nématodes bactériovores, nutrition de la plante, boucle microbienne, changements globaux, traits fonctionnels, plasticité phénotypique

La concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère a augmenté de 45% entre le début de l'ère industrielle et aujourd'hui, passant de 280 ppm à plus de 400 ppm, principalement à cause de la combustion d'énergies fossiles et de la déforestation. Les prédictions fournies par le rapport *Climate Change* par l'IPCC en 2014 suggèrent que cette concentration pourrait atteindre entre 750 et 1300 ppm d'ici la fin du XXI^e siècle. Cependant, de nombreuses études ont démontré au cours des dernières décennies que l'élévation de la concentration en CO₂ (eCO₂) affecte de différentes façons le fonctionnement des écosystèmes, en altérant notamment certains processus biologiques chez les plantes. Par exemple, l'eCO₂ stimule la fixation du carbone (C) lors de la photosynthèse et provoque une augmentation de la production de la biomasse des plantes (Dusenge *et al.*, 2018). Néanmoins, il a été observé que l'eCO₂ entraîne une diminution de la concentration en azote (N) dans les tissus des plantes, et plus particulièrement dans les tissus de leurs graines, pouvant atteindre jusqu'à 15 à 20% de N en moins selon les espèces végétales (Myers *et al.*, 2014). Il a été initialement proposé que cette diminution de la concentration en N dans les tissus végétaux provienne d'un rythme d'acquisition du N plus lent que celui de la fixation du C et de la production de biomasse, entraînant ainsi un effet de dilution du N dans une plus grande biomasse végétale (« *Growth dilution hypothesis* »). Néanmoins, des études récentes ont démontré que la diminution de la concentration en N dans les tissus des plantes est totalement indépendante de la production de la biomasse ou de la magnitude de cette même production et réfutent donc l'hypothèse d'un effet de dilution du N dans une plus grande biomasse (Feng *et al.* 2015).

À ce jour, les mécanismes responsables de la diminution de la concentration en N (et autres nutriments) dans les tissus végétaux sous eCO₂ n'ont pas encore été clairement identifiés. Or, il est crucial de le faire afin d'assurer la sécurité alimentaire et la santé humaine des sociétés futures dans le contexte du changement climatique actuel. Parmi les différentes hypothèses qui ont émergé dans la littérature, deux principaux mécanismes agissant à l'interface sol-racines ont été proposés pour expliquer la diminution de la concentration des nutriments dans les tissus des plantes : i) l'eCO₂ altère le développement des racines et/ou les processus physiologiques impliqués dans l'acquisition des ressources nutritives, entraînant ainsi une diminution de la capacité des plantes à acquérir et à utiliser les ressources ; ii) l'eCO₂ entraîne une augmentation de l'exsudation de C labile par les racines des plantes qui stimule la biomasse microbienne et provoque ensuite une diminution de la biodisponibilité des nutriments pour les plantes.

Les organismes composant le micro-réseau trophique du sol (*i.e* les racines des plantes, les bactéries, les champignons et les microbivores), ainsi que les interactions qu'ils entretiennent entre eux, sont impliqués dans de nombreux processus biogéochimiques tels que le cycle du N ou le cycle du phosphore (P). Les nématodes microbivores jouent un rôle important dans le recyclage des nutriments en consommant les microorganismes et en excréant les nutriments immobilisés dans la biomasse microbienne. Une étude récente a démontré que la présence d'organismes bactériovores dans le sol augmente la concentration en N et en P dans les racines des plantes de 30 et 50 %, respectivement, et double le taux de minéralisation nette du N dans le sol par rapport au traitement sans organisme bactériovore (Trap *et al.*, 2016). Cependant, il existe à ce jour que très peu d'études dans la littérature scientifique qui ont pour objectif de caractériser les

effets de l'eCO₂ sur les organismes bactériovores et les conséquences que cela peut entraîner sur la nutrition des plantes.

L'objectif de la présente étude est de déterminer les causes de la diminution de la teneur en nutriments dans les tissus des plantes sous eCO₂ en analysant comment l'eCO₂ affecte l'abondance, la composition et les traits fonctionnels des nématodes des sols. Une expérience en conditions contrôlées a été réalisée sur des plants de blé dur (*Triticum durum* Desf., 1798) et de tomate (*Solanum lycopersicum* L. 1753) cultivés en pots dans des chambres climatiques sous concentration atmosphérique en CO₂ ambiante (aCO₂ ; 400 ppm) et élevée (eCO₂ ; 900 ppm) à l'Ecotron (CNRS, Montpellier). Il est supposé que l'augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique provoque une augmentation du taux de rhizodéposition, ce qui aura pour effet de stimuler l'activité microbienne et entraînera une modification de la structure des communautés de nématodes.

Références

- Dusenge, M. E., Duarte, A. G., & Way, D. A., 2019. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 221(1): 32-49.
- Feng, Z., Rütting, T., Pleijel, H., Wallin, G., Reich, P.B., Kammann, C.I., Newton, P.C.D., Kobayashi, K., Luo, Y., Uddling, J., 2015. Constraints to nitrogen acquisition of terrestrial plants under elevated CO₂. *Global Change Biology*, 21: 3152-3168.
- Myers, S.S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A.D.B., Bloom, A.J., Carlisle, E., Dietterich, L.H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., Holbrook, N.M., Nelson, R.L., Ottman, M.J., Raboy, V., Sakai, H., Sartor, K.A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M., Usui, Y., 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510: 139-142.
- Trap, J., Bonkowski, M., Plassard, C., Villenave, C., Blanchart, E., 2016. Ecological importance of soil bacterivores for ecosystem functions. *Plant Soil*, 398: 1-24.

Organisé par les équipes de la Région Occitanie



Appui à l'organisation d'évènements scientifiques par Agropolis International