



RESMO

2024²⁰ ANS

24-28 MARS
VVF Semur-en-Auxois
Matière organique
Environnement
Société



www.resmo2024.sciencesconf.org

Table des matières

Thème 1. Les matières organiques et l'histoire des humains	1
Rôle de la disponibilité des composés aromatiques polycycliques de sols historiquement contaminés dans la réponse écotoxique d'organismes terrestres, Imane Aabbar [et al.]	2
La valorisation des déjections humaines au fil de l'histoire, Emmanuel Adler . . .	4
Exploration des micro-nanoplastiques dans l'estomac de thons du Pacifique : développement d'une technique de quantification par Py-GC/MS, Christelle Anquetil [et al.]	5
Distribution spatio-temporelle de la matière et des molécules organiques dans les sédiments du réseau d'assainissement de la Ville de Paris. Lien avec les pratiques et usages durant l'Anthropocène par une approche multi-proxy., Camille Asselin [et al.]	6
Altération des plastiques biodégradables et compostables par des facteurs biotiques et abiotiques, Melissa Bakhos [et al.]	8
Le paradoxe des matières organiques dans les sols agricoles : accumulation des microplastiques par l'apport de différents types de composts urbains, Gabin Colombini [et al.]	10
Flux et stockage de carbone dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales urbaines - Cas d'un bassin de rétention-infiltration routier à Nantes, Du Phuc Tho Dang [et al.]	12
Photolyse des microplastiques sous rayonnement ultraviolet (UV): émissions de gaz à effet de serre., Amélie Hoarau Belkhiri [et al.]	14
Variabilité spatiale des teneurs en métaux et produits pharmaceutiques à l'échelle d'un étang péri-urbain : cas de la Beulie à Semoy (SNO Observil, Loiret, France), Amélie Humbrecht [et al.]	15
Biais et filtres dans l'enregistrement sédimentaire des traceurs et proxies moléculaires, Jérémy Jacob	17

Quel est l'impact de l'origine de la matière organique sédimentaire sur les flux bentiques de nutriments dans les vasières côtières bretonnes ?, Laurent Jeanneau [et al.]	18
Distribution des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans des fractions de matière organique du sol le long d'un gradient altitudinal dans les Alpes Françaises (Lautaret, Hautes-Alpes), Lise Marchal [et al.]	20
Quel rôle a joué l'Atlantique tropical de l'Ouest dans les variations de l'hydroclimat et de la végétation au Nord-Est du Brésil au cours des derniers 300 000 ans ?, Louis Rouyer-Denimal [et al.]	22
Les nanoplastiques en terre inconnue, Alexandra Ter Halle	24
Macroplastiques dans le continuum Terre-Mer : vers la reconstitution de trajectoires socio-environnementales ?, Romain Tramoy [et al.]	25
Assainir la ville sans contaminer l'environnement : tout-à-l'égout et séparation à la source face au risque sanitaire lié aux matières fécales, Paul Minier	26
Thème 2 : Matières organiques extra-terrestres et précambriennes	27
La Géobiotropie, Marie-Paule Bassez	28
Matière organique d'origine cométaire dans une matrice astéroïdale ? Aperçu chimique et isotopique du continuum astéroïde-comète., Laure Bejach [et al.]	29
Matière organique et roches anciennes, Sylvain Bernard	31
Evolution de la signature D/H des acides aminés en contexte astéroïdal, Yuanyuan He [et al.]	32
Interactions matière organique et phyllosilicates dans les météorites: analyse nano-échelle in situ par MET ET XANES., Corentin Le Guillou [et al.]	33
Hétérogénéité des compositions chimique et isotopique des " bitumes " Paléoprotozoïques des gisements d'uranium du Saskatchewan : une composition " extra-terrestre " dans un monde bien terrestre., Raymond Michels [et al.]	35
Origine et évolution de la fraction organique aromatique dans les chondrites carbonées, Laurent Remusat [et al.]	36
Assessing biological innovation and trends in Earth's oxygenation using the nitrogen isotopic compositions of Precambrian organic matter, Christophe Thomazo [et al.]	38

La modélisation du spectre visible peut-elle aider à la quantification colorimétrique de biopolymères en milieu complexe ? Cas du dosage à l'anthrone pour des extraits de sols., Emmanuelle Baudu [et al.]	41
Évaluation agronomique et écologique des coques de cacao par compostage direct dans des fosses couvertes de plastique en vue de leur utilisation comme engrais organique pour les cacaoyers et d'autres cultures, Jean Baptiste Biloa	43
Un observatoire à haute fréquence de la respiration des sols en milieu forestier tempéré en Bourgogne Franche Comté, Julianne Capelle [et al.]	44
Effet des pratiques viticoles sur les stocks de carbone organique des sols du vignoble bourguignon, Elodie Cognard [et al.]	45
Applicabilité de composés organiques microbiens (acides gras 3-hydroxylés) comme marqueurs de température et de pH en milieu lacustre, Arnaud Huguet [et al.]	47
Quantification de la rhizodéposition et du priming effect pour des cultures intermédiaires via un marquage au $^{13}\text{CO}_2$., Baptiste Hulin [et al.]	49
Distribution du carbone organique dans le sédiment d'interface de l'étang de la Beulie (SNO Observil, Loiret, France), Amélie Humbrecht [et al.]	50
Sonder les interactions microbes-minéraux-matières organiques dans les sols par spectromicroscopie infrarouge photothermique, Floriane Jamoteau [et al.]	52
Répétabilité et reproductibilité des analyses de la composition chimique de la matière organique naturelle par thermochimie GC-MS : exercice d'inter-comparaison au sein du réseau GEOF, Marine Liotaud [et al.]	53
Caractérisation et modélisation du rôle de la matière organique et des amendements en Cu(II) et Zn(II) sur la sorption et le transfert réactif de l'antibiotique sulfaméthoxazole dans un sol limono-sableux, Jean Martins [et al.]	55
Une réduction des précipitations stimule l'augmentation de la teneur en carbone organique dans la rhizosphère de l'eucalyptus dans un ferralsol du Brésil, notamment en profondeur, Céline Pradier [et al.]	56
Impact du chaulage sur les émissions de CO_2 par les sols : des effets contrastés observés à différentes échelles., Camille Rousset [et al.]	58
Recommendations and good practices for Dissolved Organic Carbon (DOC) analyses at low concentrations: effects of vials, filters and membranes, acids, sample matrix, re-used septa, Delphine Tisserand [et al.]	60
Utilisation d'un nouveau capteur de fluorescence pour la caractérisation in situ, en temps réel et à haute fréquence de la matière organique dissoute en dans les milieux aquatiques, Gilles Varrault [et al.]	62

Hétérogénéité des matières organiques dissoutes produites par les végétaux et évolution au cours de la biodégradation, Alienor Allain [et al.]	65
Composition moléculaire de la MOD des écosystèmes arctiques et lien avec la composition du couvert végétal, Alienor Allain [et al.]	67
Les lessivats de litière modifient-ils le puits de méthane des sols forestiers ?, Vincent Arricastes [et al.]	69
Déstabilisation du carbone organique dans les sols de montagne face au réchauffement climatique, Nicolas Bonfanti [et al.]	70
Quels sont les paramètres contrôlant la sensibilité à la température de la matière organique des sols forestiers ?, Clément Bonnefoy-Claudet [et al.]	71
Variation verticale et horizontale des stocks de carbone organique au long d'une toposéquence au Nord Est de l'Algérie, Zohra Bounouara [et al.]	73
Stocks de carbone dans des sols sous agriculture familiale en Afrique Sub-Saharienne – les enseignements du projet SoCa, Lydie Chapuis-Lardy [et al.]	75
Origin of long-term soil organic carbon persistence revealed by nanoscale analyses, Mathieu Chassé [et al.]	77
Effet des pratiques agricoles sur la stabilité structurale des sols et la déprotection des matières organiques lors de cycles de dessiccation – réhumectation, Clémentine Chirol [et al.]	78
Étude de la complémentarité des fractions thermiques et physiques du carbone organique des sols, Amicie Delahaie [et al.]	80
Evaluation de l'activité microbienne et de la stabilité structurale des sols à l'échelle parcellaire, Julie Foulon [et al.]	82
CarboNium : Dynamique du Carbone dans le continuum terrestre - aquatique, Laure Gandois [et al.]	83
Flux de carbone dans les sols cultivés : Oublions-nous de prendre en compte des entrées de carbone dans les sols agricoles ?, Guillaume Humbert [et al.]	84
Caractérisation thermo-chimique de la matière organique dans les sols agricoles soumis à différents types de fertilisation, Thomas Lerch [et al.]	86
Impact de résidus de légumineuses sur la minéralisation et stabilisation du carbone organique par les communautés microbiennes du sol, Anouk Lyver [et al.]	87

Comment les champignons transforment-ils la litière végétale ? Focus sur la matière organique extractible à l'eau, Thanh Thuy Nguyen Tu	89
Impact de la nature du couvert végétal et des caractéristiques des sols sur la stoechiométrie de ces deux compartiments dans différents habitats arctiques., Hugo M.g. Potier [et al.]	90
Effets de méthodes de préparation mécanisée du site en contexte de plantation forestière sur les stocks de carbone organique du sol et sur le priming effect., Lucas Poullard [et al.]	92
Caractérisation de la matière organique dissoute dans les glaces de tourbières à pergélisol, Lucía Pérez Serrano [et al.]	93
Réhabilitation de sols de carrière calcaire en milieu semi-aride : impact des plantes sur l'agrégation de Technosols, Françoise Watteau [et al.]	95
Thème 5 : La biodiversité au cœur de la dynamique des MO	97
Influence des formations végétales, du microclimat et des caractéristiques du sol sur la distribution à l'échelle fine des champignons ectomycorhiziens, Hyppolite Aignon	98
Effets du régime hydrique des sols sur les communautés végétales et la composition des matières organiques dans deux écosystèmes Arctiques, Marie A. Alexis [et al.]	99
Rôle des interactions bactériennes dans la dynamique des MO des ferralsols agricoles malgaches en fonction des amendements et des populations des vers de terre, Arthur Cousson [et al.]	101
Rôle de la biodiversité sur la dynamique de la matière organique du sol : cadre conceptuel, avancées méthodologiques et futures étapes, Nicolas Fanin	103
Diversité et rôles des microorganismes telluriques dans les processus de décomposition des matières organiques fongiques de qualité biochimiques contrastées, Elsa Hilaire [et al.]	104
Les traits des essences forestières déterminent la composition de la matière organique du sol en interaction avec le contexte pédoclimatique, Fadwa Khalfallah [et al.]	105
Impact du Rhododendron ponticum sur la dégradation de la matière organiques des sols forestiers, Erwan Le Jeune	107
Who is who in necromass formation and stabilization in soil? Unraveling the role of fungi and bacteria as complementary players of biogeochemical functioning., Selina Lepori [et al.]	108

Apports de fumier et intégration de prairies temporaires dans les systèmes de culture : quels effets sur les teneurs en matières organiques et les communautés microbiennes (abondance, diversité et fonctions) des sols ?, Caroline Petitjean [et al.]	109
L'impact des vers de terre sur la minéralisation des matières organiques du sol éclairé d'un jour nouveau les classifications écologiques des vers de terre, Luna Vion-Guibert [et al.]	111
Origines et regeneration des biopores du sol en conditions pédoclimatique contrastées, Charlotte Védère [et al.]	113
Influence des traits morphologiques, anatomiques, physiologiques et comportementaux des vers de terre tempérés sur les propriétés physico-chimiques des turricules., Yacouba Zi [et al.]	115
Traçage de la matière organique d'origine terrigène en milieu aquatique : développement de nouveaux marqueurs moléculaires d'origine bactérienne, Zhe-Xuan Zhang [et al.]	117

Thème 6 : Modélisation à toutes les échelles **119**

CAMMISOL: couplage multi-agents de modèles mathématiques et informatiques pour la simulation du bio-fonctionnement des sols., Paul Breugnot [et al.]	120
Estimation de la capacité de stockage additionnelle de carbone organique à horizon 2050 à l'échelle d'un petit territoire, en fonction du type de sol et de la profondeur, Clémentine Chirol [et al.]	122
Modélisation de l'évolution des stocks de carbone organique dans les sols : travaux et perspectives de recherche autour du modèle AMG, Hugues Clivot [et al.]	124
Le priming effect comme un exemple de changement d'échelle : de l'observation en laboratoire à la modélisation à l'échelle globale, Bertrand Guenet	126
Proposition d'un prototype pour le monitoring à large échelle et haute résolution des composantes du bilan carbone des parcelles de grandes cultures, Ainhoa Ihasusta [et al.]	127
Modélisation de la réactivité des mélanges complexes d'hydrocarbures en milieu géologique., Raymond Michels [et al.]	129
Optimisation de la productivité du riz pluvial à Madagascar : Assemblage des matières fertilisantes organiques et minérales à l'aide d'un modèle combinatoire, Manoa Raminoarison [et al.]	131
Prédiction de la qualité sanitaire d'une zone de baignade en Seine grâce à la spectrométrie de fluorescence et la sonde Fluocopée®, Antoine Raoult [et al.]	133

Thème 1. Les matières organiques et l'histoire des humains



Rôle de la disponibilité des composés aromatiques polycycliques de sols historiquement contaminés dans la réponse écotoxique d'organismes terrestres

Imane Aabbar ¹, Coralie Biache ^{*1}, Carole Cossu-Leguille ¹, Clement Bojic ¹, Catherine Lorgeoux ², Jean-François Masfaraud ¹, Pierre Faure ^{*1},

¹ Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux – Institut Ecologie et Environnement - CNRS Ecologie et Environnement, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Terre et Environnement de Lorraine – France

² GeoRessources – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre de recherches sur la géologie des matières premières minérales et énergétiques, Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Plus de 300 000 sites potentiellement impactés par des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ont été recensés en Europe, dont plus de 1 500 en France (BASOL). Le diagnostic et le suivi de ces sites se fait généralement par la quantification des composés réglementés (16 HAP US-EPA) sans toutefois tenir compte de leur disponibilité et de la présence de contaminants apparentés tels que les composés aromatiques polycycliques (CAP) polaires. L'exposition d'organismes terrestres à des sols fraîchement contaminés par les HAP ou les CAP polaires, est connue pour provoquer des effets toxiques importants. Cependant, les sols historiquement contaminés, comme les sols d'anciennes cokeries, induisent généralement un impact toxique limité, en raison du phénomène de " vieillissement " (ou " aging "), entraînant une réduction de la disponibilité des CAP dans le temps. La disponibilité est donc un paramètre crucial à prendre en compte lors de l'évaluation des risques associés à une contamination au CAP. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le rôle de la disponibilité des CAP d'un sol historiquement contaminé dans la réponse toxique d'organismes terrestres. Ainsi, deux sols historiquement contaminés ayant subi un " vieillissement " naturel (disponibilité en CAP limitée), ont été étudiés. Ces sols ont été modifiés pour (i) augmenter la disponibilité de la contamination (chauffage modéré) ou (ii) éliminer la pollution (extraction solvant). Les modalités " brutes " et " chauffées " permettent de comparer des niveaux de disponibilité différents tandis que les sols extraits constituent des références sans contaminant. Les paramètres physico-chimiques, les niveaux de contamination et la disponibilité ont été déterminés pour ces trois modalités de sol. En parallèle, des tests d'écotoxicité standardisés (plantes et vers de terre) ont été réalisés sur les sols bruts, chauffés et extraits. Les résultats ont démontré que les sols historiquement contaminés exposés à un chauffage modéré présentaient les réponses écotoxiques les plus élevées. En effet, le chauffage a permis d'augmenter la (bio)disponibilité des CAP, sans modifier les autres

*Intervenant

propriétés physico-chimiques du sol, ce qui permet d'imputer directement les effets toxiques observés à l'augmentation de la disponibilité. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte ce paramètre dans l'évaluation des risques. Ils suggèrent, par ailleurs, que la méthode de chauffage modéré constitue un outil possible pour une évaluation des risques à long terme associés aux sols historiquement contaminés plus protectrice pour l'environnement et la santé humaine, qui peut s'avérer pertinente dans le contexte de changement climatique actuel.

La valorisation des déjections humaines au fil de l'histoire

Emmanuel Adler * 1

¹ Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains – Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – France

L'objet de cet article est de présenter au fil de l'Histoire les différentes modalités de recyclage des déchets organiques produits par les villes, avec un focus particulier sur les déjections humaines, ressource agronomique amendante et nutritive, mais également facteur de risques sanitaires(1). Si les relations complexes entretenues entre les êtres humains et leurs déjections sont conditionnées par la dimension socio-culturelle, compte tenu de leur origine et de leur nature, ces dernières sont généralement considérées comme des ordures immondes dans la plupart des civilisations, avec cependant de grandes nuances. Par leur caractère impur, les déjections doivent être circonscrites à des lieux déterminés, avec des règles, plus ou moins bien observées, et des pratiques, plus ou moins surveillées et sanctionnées, comme l'a analysé l'anthropologue Mary Douglas(2).

Aussi, pour employer ce matériel résiduel urbain pour fertiliser les terres arables et produire en retour la nourriture qui leur est nécessaire, les villes, dans le cadre de concertations plus ou moins réussies avec les agriculteurs, ont mis en œuvre un ensemble complexe de techniques, en évolution au cours des siècles. S'accéléralant de façon quasi exponentielle à partir de la seconde moitié du XIXe s. avec le développement de l'adduction en eau potable livrée à domicile en ville, ce mécanisme de répulsion est à l'origine de l'assainissement des eaux usées urbaines. Soumis à la double contrainte de maîtriser le risque sanitaire, mais également d'assurer une valorisation performante de la matière organique, les services de gestion des déjections humaines attestent d'une prodigieuse diversité, démontrant l'inventivité des êtres humains en la matière. Cet article se propose précisément d'illustrer au fil du temps l'évolution et la variété des systèmes d'assainissement.

Le sujet est appréhendé depuis les premiers équipements destinés à recueillir les matières solides et liquides, en passant par les conduites et les fosses de stockage, jusqu'aux opérations logistiques d'extraction, de déplacement et de transformation, pour conclure sur la victoire du tout-à-l'égout. Soulevant le voile sur la part de secret qui caractérise tout ce qui touche aux déjections humaines, ce travail tente d'apporter un éclairage nouveau sur ce secteur d'importance, en particulier dans un contexte d'économie circulaire et de transition énergétique.

(1) Emmanuel ADLER, La gestion des déjections humaines : un défi urbain. Le cas de la ville de Lyon, de la fin du 18e au début du 20e siècle. Thèse de l'Université Paris Est, 2020

(2) Mary DOUGLAS, De la souillure. Essai sur les notions de pollution et de tabou, Paris, La Découverte, 1986

*Intervenant

Note : Ce résumé n'a pas fait l'objet d'une communication au séminaire ResMO 2024

Exploration des micro-nanoplastiques dans l'estomac de thons du Pacifique : développement d'une technique de quantification par Py-GC/MS

Christelle Anquetil *¹, Tony Gardon², Ika Paul-Pont², Arnaud Huvet²,
Valerie Allain³, Katell Quenea¹, Anne Lorrain²

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin (LEMAR) – Institut de Recherche pour le Développement, Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Université de Brest, Institut Universitaire Européen de la Mer, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Communauté du Pacifique, Nouméa – Nouvelle-Calédonie

La présence généralisée des contaminants représente une préoccupation majeure pour la santé humaine et l'environnement. Parmi ces contaminants d'intérêt émergent, les déchets microplastiques (MP, $1 \mu\text{m} < \text{MP} < 5 \text{mm}$) occupent récemment une place prépondérante, faisant l'objet d'études approfondies dans diverses matrices environnementales (e.g., eau, air, sédiment, biote). Jusqu'à présent, l'analyse de ces particules repose principalement sur la spectrométrie Raman et/ou Infra-Rouge à Transformée de Fourier (FTIR), afin d'identifier le type de polymère. Cependant, ces approches méthodologiques sont très chronophages et se restreignent à l'identification de particules de taille supérieure à $5 \mu\text{m}$. Ces verrous méthodologiques limitent ainsi nos connaissances sur la quantité et la nature des particules inférieures à ce seuil d'identification tandis que les plus petits MP et les nanoplastiques (NP, *Katsuwonus pelamis*) et du thon jaune (*Thunnus albacares*) afin d'anticiper le risque lié à cette contamination pour les ressources et les pêcheries associées. Pour répondre à cette problématique, une méthode analytique a été adaptée et développée à partir d'échantillons dont la matière organique a été en partie digérée par oxydation (KOH et H₂O₂), filtrés sur filtres GF/C et analysés par FTIR (MP > 2 mm), puis cryobroyés à l'azote liquide. À l'issue du cryobroyage, les échantillons sous forme de poudre homogène ont été analysés par Py-GC-MS par la technique des ajouts dosés. Afin d'avoir des valeurs robustes, 5 ajouts dosés par échantillon ont été réalisés, des seuils de rapport Signal/Bruit > 10 ont été vérifiés afin de considérer ou non les pics, et des mesures de blancs ont été faites. Les coefficients de corrélation obtenus sont au minimum de $r^2=0.94$, avec une grande majorité à 0.99. Des résultats quantitatifs sur un panel de polymères (e.g., Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), Nylon, Polypropylène (PP), Polychlorure de vinyle (PVC), Polytéréphtalate d'éthylène (PET), Polyéthylène (PE), Polystyrène (PS)) ont pu être obtenus avec différents niveaux de certitude selon le type de plastique. Des teneurs allant de quelques dizaines de nanogrammes à plusieurs microgrammes par milligramme d'échantillon pour certain polymère ont été mesurés, soulignant l'efficacité de cette approche méthodologique. Il a ainsi pu être mis en évidence l'ingestion et la possible contamination par les plastiques des thons et bonites.

*Intervenant

Distribution spatio-temporelle de la matière et des molécules organiques dans les sédiments du réseau d'assainissement de la Ville de Paris.

Lien avec les pratiques et usages durant l'Anthropocène par une approche multi-proxy.

Camille Asselin *¹, Jérémy Jacob¹, Thomas Thiebault², Gauthier Bernier-Turpin^{2,3}, Régis Moilleron³

¹ Géochronologie Traceurs Archéométrie – Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, 91198 Gif-sur-Yvette, France – France

² Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains – Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – France

Les villes sont des lieux universels des sociétés, qui concentrent les fonctions d'autorité, d'échanges et de production des richesses. Malgré ces fondamentaux, toutes les villes sont différentes de par, leur démographie, taille, morphologie, diversité culturelle ou bien paysage. Ces différences induisent de nombreuses hétérogénéités entre les villes, mais aussi à l'échelle de chacune d'elles. Comment rendre compte de ces hétérogénéités du milieu urbain et de leurs évolutions ? Les sédiments qui transitent dans le réseau d'assainissement constituent une mine d'information sur le fonctionnement et l'évolution de la ville (pratiques de consommation, usages...). Dans le cadre du projet ANR EGOUT, nous supposons que la distribution spatiale et l'évolution temporelle des traceurs archivés dans les sédiments des égouts reflète la diversité des conditions à la surface et leur trajectoire temporelle.

Le réseau d'assainissement parisien est maillé de 159 bassins de dessablement (BD) qui accumulent les sédiments afin d'éviter la saturation du réseau. Chaque BD est curé tous les 1 à 3 ans et accumule les sédiments qui transitent dans ce réseau unitaire (eaux résiduaires urbaines). Pour attribuer les résultats de l'analyse géochimique des sédiments aux territoires correspondants, il a fallu d'abord définir les zones d'apport de chaque BD sur la base des réseaux drainants, en prenant en compte deux échelles de drainage (temps de pluie et temps sec) et en mettant en évidence un système de cascade sédimentaire.

En juin 2023, 24 carottes de sédiments ont été prélevées dans 6 BD préalablement sélectionnés. Les sédiments sont stratifiés avec deux faciès distincts : un faciès clair, grossier et minéral et un faciès sombre, fin et organique. Les carottes ont été échantillonnées selon ces différents faciès. Les paramètres globaux de caractérisation de la matière organique (COT, IH, IO, Tmax, C/N, $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) ont été déterminés par pyrolyse Rock-Eval et analyseur élémentaire couplé à un

*Intervenant

spectromètre de masse à rapports isotopiques. En parallèle, 72 molécules organiques (produits pharmaceutiques, drogues licites et illicites et traceurs du bol alimentaire) ont été quantifiées dans les sédiments, après extraction puis analyse par chromatographie liquide à haute performance associée à la spectrométrie de masse en tandem.

Les résultats préliminaires sur une carotte ont permis de quantifier 51 molécules, mettant en évidence le potentiel de ces sédiments pour enregistrer différents types de traceurs (drogues illicites, produits pharmaceutiques), malgré une granulométrie grossière. Ces résultats mettent en évidence des variations verticales très importantes des teneurs en molécules organiques, comme cela avait déjà été démontré lors de travaux antérieurs. Ces résultats permettent de discuter la distribution spatiale et temporelle de la matière et des molécules organiques en regard des spécificités socio-économiques de chaque zone d'apport et des trajectoires temporelles. Nos résultats apportent également des informations essentielles sur les modalités d'archivage de ces molécules dans les sédiments selon les faciès.

Altération des plastiques biodégradables et compostables par des facteurs biotiques et abiotiques

Melissa Bakhos * ^{1,2}, Cornélia Rumpel ¹, Philippe Biron ¹, Axel Felbacq ¹,
Dominique Patureau ³, Fabienne Lagarde ⁴, Margaux Glais ^{4,5},
Marie-France Dignac ¹

¹ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

² Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie – 20, avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France – France

³ Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement [Narbonne] – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement : UR0050, Institut Agro Montpellier, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

⁴ Institut des molécules et matériaux du Mans – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6283, Le Mans Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ CT-IPC Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites, 61250 Damigny – France – Pôle Universitaire de Montfoulon – France

L'utilisation de plastiques biodégradables et compostables (normes NF EN 13-432, NF T 51-800) est souvent présentée comme une solution durable aux préoccupations environnementales croissantes liées aux plastiques à usage unique. Cependant, le devenir de ces matériaux après leur exposition aux conditions environnementales a été peu étudié. L'objectif de notre étude est d'étudier les changements physiques et chimiques survenant lorsque ces matériaux sont soumis à des processus de compostage et de vieillissement physique.

Nous nous sommes concentrés sur deux films biodégradables (un plastique commercial à base de PBAT et un plastique innovant à base d'éthyl de cellulose) et nous les avons comparés à des films de polyéthylène conventionnels. Nous avons étudié l'impact de ces matériaux sur le processus de compostage et leur devenir après le compostage dans des conditions contrôlées et après une exposition à des rayons UV.

Pendant le compostage, les différents types de films plastique ont montré divers effets sur la décomposition de la matière organique et l'activité microbienne. Le compost contenant le plastique innovant a montré le pourcentage de matières sèches le plus bas au cours des différentes phases du processus de compostage, indiquant une potentielle rétention d'humidité sur les films. Lors du compostage avec des films en polyéthylène, la matière organique a été plus faiblement dégradée que lors des composts avec les autres matériaux, comme en témoigne un pourcentage plus élevé de matière volatile en fin de phase de fermentation. Les films de PBAT se sont fragmentés en macro et microplastiques pendant le compostage, tandis que les films innovants et en polyéthylène n'ont montré aucune fragmentation.

*Intervenant

Suite à l'exposition aux rayons UV, à la fois les films PBAT et polyéthylène sont devenus plus fragiles et sujets aux fissures. Les analyses en spectroscopie IR ont révélé une photo-oxydation du polyéthylène et des variations dans les nombres de pics pour le PBAT, mettant en évidence des réponses distinctes au vieillissement induit par les UV pour chaque polymère.

En résumé, nos résultats révèlent les comportements complexes des plastiques au sein des composites et en conditions environnementales, soulignant la nécessité d'études approfondies pour évaluer la véritable durabilité des nouveaux matériaux dans la lutte contre la pollution plastique.

Le paradoxe des matières organiques dans les sols agricoles : accumulation des microplastiques par l'apport de différents types de composts urbains

Gabin Colombini *¹, Cornélia Rumpel¹, Sabine Houot², Philippe Biron¹, Marie-France Dignac¹

¹ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

² Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

Les microplastiques (MP) sont des particules plastiques de taille comprise entre 1 μm et 5 mm (1). Ce sont des polluants émergents aujourd'hui présents dans l'ensemble des écosystèmes terrestres et aquatiques (2). Dans les sols agricoles, les sources de contamination par les MP sont nombreuses mais les niveaux de contamination sont largement inconnus (3). Dans le cadre d'une économie circulaire, l'utilisation du compost de déchets urbains en tant qu'amendement des sols est encouragée pour participer au maintien de leur fertilité. Or, le compost peut être une source importante de MP en fonction de la qualité du tri des matières compostables. Ainsi les composts urbains assurent à la fois un maintien de la fertilité sols agricoles tout en étant un vecteur de pollution. Ce concept est défini comme le paradoxe des matières organiques des sols agricoles.

Afin de mieux comprendre l'impact des différents types de composts urbains sur les teneurs en microplastiques dans les sols agricoles, différentes études ont été menées sur un dispositif *in situ* longue durée. Le but de ces études était d'évaluer comment l'application répétée de composts dérivés de différents types de déchets urbains impacte la nature et la quantité de MP dans les sols. Pour répondre à cet objectif, deux fractions de MP ont été étudiées : les MP grossiers (2-5 mm) et fins (< 2 mm).

Les travaux ont été conduits sur l'essai PRO du dispositif Qualiagro, qui a reçu pendant 22 ans des composts de déchets urbains issus de biodéchets (BIO), d'ordures ménagères résiduelles (OMR) ou de déchets verts co-compostés avec des boues de station d'épuration (DVB). Après échantillonnage des sols et des composts, la fraction grossière des MP a été récupérée par tri manuel tandis que la fraction fine a été étudiée suite à un fractionnement physique du sol. La pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse (pyrolyse/GC/MS) a été utilisée pour caractériser et quantifier les MP.

Les résultats présentés concerneront les teneurs en microplastiques dans les sols et les composts

*Intervenant

du dispositif expérimental entre 1998 et 2021. L'impact des différents types de compost sera mis en évidence et les résultats seront discutés au regard des normes qui encadrent l'utilisation des composts, notamment en termes de seuil de plastique acceptable.

(1) J. P. G. L. Frias and R. Nash, "Microplastics: Finding a consensus on the definition," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 138, no. 2018, pp. 145–147, 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.

(2) M. Bläsing and W. Amelung, "Plastics in soil: Analytical methods and possible sources," *Sci. Total Environ.*, vol. 612, pp. 422–435, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.086.

(3) L. Nizzetto, M. Futter, and S. Langaas, "Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 20, pp. 10777–10779, 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b04140.

Flux et stockage de carbone dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales urbaines - Cas d'un bassin de rétention-infiltration routier à Nantes

Du Phuc Tho Dang ^{1,2}, Liliane Jean-Soro ^{* 1,2}, Béatrice Béchet ^{*1,2}

¹ Eau et Environnement – Université Gustave Eiffel – France

² Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville - FR 2488 – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Université d'Angers, Institut des Sciences Humaines et Sociales - CNRS Sciences humaines et sociales, Institut National des Sciences de l'Univers, La Rochelle Université, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes - CNRS Ingénierie, Air Pays de la Loire, IMT Atlantique, Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, NANTES UNIVERSITÉ - École nationale supérieure d'architecture de Nantes, Institut Agro Rennes ANgers – France

La gestion des eaux de ruissellement urbaines repose pour partie sur des ouvrages de gestion à la source ou décentralisés, qui remplissent deux fonctions : une fonction de régulation des flux d'eau lors des événements pluvieux, et une fonction d'épuration des eaux de ruissellement chargées en divers polluants émis par le trafic routier mais aussi par les infrastructures, les bâtiments et, l'usage des espaces publics, en ce qui concerne les déchets. La charge particulière des eaux collectées dans les ouvrages (bassin, noue) décante et conduit à la formation de sédiments en fond d'ouvrage.

Dans les eaux de ruissellement, les matières en suspension et les substances polluantes sont riches en carbone organique d'origine naturelle et anthropique : carburants, fluides, déchets, produits de traitement des façades mais aussi résidus végétaux, déjections animales, ... La matière organique transportée par les eaux va être une des composantes majeures des sédiments, à laquelle va s'ajouter la matière organique issue de la végétation (et la microfaune) qui se développe dans les ouvrages. Les sédiments sont marqués par la présence notable de déchets, notamment des déchets plastiques (Ledieu et al, 2022), qui contribuent par dégradation à la teneur en carbone organique, en sus des polluants de type hydrocarbures (El-Mufleh et al, 2014).

Des données de teneur en matière organique (sédiment, valeur estimée à partir de la détermination de la matière volatile - NF EN 15935, Janvier 2013) ou en carbone organique (eaux) ont été recueillies au niveau d'un bassin de rétention-infiltration des eaux de ruissellement du pont de Chevire sur le périphérique nantais (trafic très élevé de 100 000 véh/j). Elles ont permis d'estimer le stock de carbone organique dans l'ouvrage et les flux de carbone en entrée et sorties du bassin (infiltration des eaux, surverse). Pour un sédiment d'une épaisseur moyenne de 10 cm,

*Intervenant

la teneur en carbone estimée est de 18 kg/m². Les opérations de maintenance des bassins couplées à des cycles de colonisation variables par la végétation entraîne une hétérogénéité en termes de stock avec la formation de sédiments de nature plus minérale, moins propice au piégeage des polluants.

Les teneurs en carbone organique des eaux sont très variables, tant en entrée (3 à 117 mg/L sur une quinzaine d'évènements échantillonnés) que dans les eaux porales du substrat alluvial sous-jacent de la couche de sédiments (2 à 20 mg/L). Une remobilisation de particules colloïdales de nature organique et/ou minérale est observée, en complément de la mobilisation de carbone dissous. L'estimation de la perte de carbone par infiltration dans le sol du bassin indique une " fuite " très modérée. Le sédiment constitue donc un lieu de stockage important du carbone mais aussi un milieu réactif soumis à une forte activité bactérienne. L'évolution des teneurs hors opération de maintenance serait un élément pour évaluer ce stockage à moyen terme.

Références

- El-Mufleh A., Béchet B., Ruban V. et al., 2014. Environ Sci Pollut Res 21, 5329-5346.
Ledieu L., Tramoy R., Ricordel S. et al., 2022. Environmental Pollution, 303, 119145.

Photolyse des microplastiques sous rayonnement ultraviolet (UV): émissions de gaz à effet de serre.

Amélie Hoarau Belkhiri * ¹, Mohammed Boussafir ¹

¹ GéoHydrosystèmes COntinentaux – Université de Tours – France

L'importante production et la persistance des plastiques dans l'environnement représentent une préoccupation majeure pour la communauté scientifique et pour la société. Alors que de nombreuses études se penchent sur la dispersion des microplastiques dans les milieux marins, peu se sont intéressées aux émissions des produits de dégradation des plastiques. Les microplastiques sont définis comme des particules de taille inférieure à 5mm, et sont sujets à différents types de dégradations biotiques et abiotiques. La photolyse est le principal facteur conduisant à la dégradation du polymère dans les environnements de surface terrestre. Celle-ci dépend du type de plastique en particulier de leur capacité à réagir à certaines longueurs d'ondes des radiations solaires. Nous nous sommes intéressés dans cette étude à comprendre la contribution de la photodégradation quant à la production de gaz à effet de serre en utilisant une approche expérimentale. Les plastiques sélectionnés, représentent les principaux types issus de la demande européenne : le polypropylène (PP), le polyéthylène à faible densité (LDPE), le polyéthylène à haute densité (HDPE), le polyethylene terephthalate (PET), le polystyrène (PS). Ces polymères sont exposés à des radiations solaires simulées dans une structure artificielle disposant de deux lampes UV (300W/m²) présentant un spectre équivalent aux radiations solaires. Les échantillons ont été exposés pendant 1, 2, 3 et 4 semaines. La photolyse induit une dégradation moléculaire et structurelle, révélées grâce à la spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (FTIR), à la microscopie électronique à balayage (MEB), la chromatographie en phase gazeuse avec détecteur de conductivité thermique (GC-TCD). Une production de gaz a été mise en évidence pour tous les types de plastiques, avec une augmentation des concentrations en fonction du temps de dégradation. Ces émissions varient en fonction du type de plastique et du temps d'exposition aux radiations solaires. Les résultats indiquent que les plastiques émettent du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane (CH₄) et de l'hydrogène (H₂). De plus, les analyses spectroscopiques et microscopiques confirment les changements moléculaires et la détérioration de la surface des microplastiques accompagnée d'une augmentation du nombre de crevasses, de fractures au cours de la dégradation. Ainsi, les résultats obtenus démontrent que les plastiques représentent une source de gaz à effet de serre. Ces conclusions soulignent l'importance de mieux comprendre les mécanismes de dégradation et les émissions de gaz associées, compte tenu de l'augmentation de la production et de l'accumulation de plastique dans l'environnement, avec des implications néfastes pour les écosystèmes et la santé humaine.

*Intervenant

Variabilité spatiale des teneurs en métaux et produits pharmaceutiques à l'échelle d'un étang péri-urbain : cas de la Beulie à Semoy (SNO Observil, Loiret, France)

Amélie Humbrecht ^{* 1}, Gauthier Bernier-Turpin ², Anaëlle Simonneau ¹, Thomas Thiebault ³, Claude Lemilbeau ¹, Gildas Ratié ⁴, Rachel Boscardin ¹, Marielle Hatton ¹, Lydie Le Forestier ¹

¹ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre, Institut National des Sciences de l'Univers, Université d'Orléans, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains – Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – France

³ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR 6112] – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Nantes université - UFR des Sciences et des Techniques – France

En contexte urbain, des contaminants tels que des métaux et des produits pharmaceutiques (PP), sont émis dans l'environnement bien souvent par le biais des effluents des stations d'épurations. Ils sont susceptibles de nuire à la qualité des eaux, mais aussi des sédiments, notamment lorsqu'ils se concentrent dans des zones de rétention. L'étang de la Beulie, situé dans le bassin versant de l'Egoutier à Semoy (Loiret, France), joue un rôle clé dans la rupture de la cascade sédimentaire du ru Egoutier. En conséquence, il permet l'accumulation de sédiments dans lesquels des teneurs importantes en contaminants ont été mesurées (Ledieu et al., 2021). En l'occurrence, 2 métaux (Cu, Zn) et 8 PP (1 anionique (diclofenac), 2 cationiques (tramadol et aténolol), et 5 non chargés (paracétamol, carbamazépine, diazépam, oxazépam et triméthoprime)), sont ici particulièrement étudiés. Ils proviennent majoritairement des effluents de la station d'épuration de l'hôpital psychiatrique située en amont (Desaulty et Millot, 2017). La variabilité spatiale des teneurs en contaminants à l'échelle de l'étang, en lien possiblement avec le rôle joué par la physico-chimie de ses eaux (pH, conductivité électrique (CE), O₂ dissous, potentiel d'oxydo-réduction) dans leur spéciation, restent pour l'instant un verrou. L'objectif de l'étude est de cartographier leur concentration à l'échelle de l'étang, et de caractériser finement le sédiment pour discuter des conditions d'accumulation, de la géochimie des eaux et de celle du sédiment. Parmi les 57 bennes Ekman réalisées depuis 2018 à l'échelle de l'étang afin de couvrir l'ensemble des zones du bassin (berges, profondeurs, delta, exutoire), 43 ont été caractérisées par pyrolyse Rock-Eval pour la teneur en carbone organique totale (COT), dont 15 qui ont été utilisées pour des analyses plus poussées par granulométrie laser pour la distribution

*Intervenant

granulométrique ; par LC-MS pour les concentrations en PP, et par ICP-MS liquide pour les concentrations en Cu et Zn. L'ensemble des résultats a été analysé par statistiques descriptives, mettant en évidence une hétérogénéité de la matrice particulaire à l'échelle de l'étang. Ainsi, d'amont en aval, les teneurs en COT diminuent, tandis que celles en particules fines (

Biais et filtres dans l'enregistrement sédimentaire des traceurs et proxies moléculaires.

Jérémy Jacob*¹

¹LSCE – Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] – France

Quelle image nous offrent les biomarqueurs moléculaires préservés dans les archives sédimentaires des époques dont ils proviennent ? En quoi sont-ils le reflet exact de la réalité de l'époque ?

Durant cet exposé et à travers des exemples issus de la littérature, j'aborderai les questions de représentativité des biomarqueurs moléculaires en termes de source/production/rôle, des quantités mesurées (au-delà des vieux débats productivité/préservation et de l'impact de la diagenèse), de la biodiversité, des disparités spatiales et des décalages temporels. Identifier et quantifier ces filtres semble être une voie de recherche au moins aussi respectable que la simple et nécessaire livraison d'outils (aussi performants soient-ils) à d'autres communautés scientifiques. Par ailleurs, un tel effort engagerait la communauté des géochimistes organiciens, déjà fortement interdisciplinaire, à encore plus d'interdisciplinarité. Je présenterai donc nos travaux actuels dans les égouts qui s'inscrivent dans cette volonté.

*Intervenant

Quel est l'impact de l'origine de la matière organique sédimentaire sur les flux benthiques de nutriments dans les vasières côtières bretonnes ?

Laurent Jeanneau * ¹, Emilie Jardé ¹, Justine Louis ², Alexandrine Pannard ³, Marine Liotaud ¹, Françoise Andrieux-Loyer ⁴, Gérard Gruau ¹, Florian Caradec ⁴, Emilie Rabiller ⁴, Nathalie Le Bris ³, Annet Laverman ³

¹ Géosciences Rennes – Université de Rennes 1, Université de Rennes, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Centre d'études et de valorisation des algues – CEVA – France

³ Ecosystèmes, biodiversité, évolution [Rennes] – Université de Rennes, Institut Ecologie et Environnement - CNRS Ecologie et Environnement, Centre National de la Recherche Scientifique, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes – France

⁴ Dynamiques des Écosystèmes Côtiers – Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer – France

Les vasières du littoral breton seraient une source potentielle de nutriments dissous qui alimenteraient les efflorescences d'algues vertes responsables de dommages sanitaires et économiques. Les sédiments de vase sont des réacteurs dans lesquels la matière organique sédimentaire (MOS) est consommée par les micro-organismes qui produisent des flux benthiques diffusifs d'azote sous forme d'ammonium NH_4^+ et de phosphore sous forme de phosphate PO_4^{3-} . L'origine de la MOS a souvent été mentionnée comme un facteur contrôlant sa réactivité.

Pour qualifier et quantifier le lien entre l'origine de la MOS et la production de flux benthiques, 200 échantillons provenant de 45 stations sur 12 sites d'étude représentant les masses d'eau du littoral breton sujettes à des proliférations d'algues vertes sur vase ont été prélevés. Ces échantillons ont été (i) incubés pour déterminer leur capacité à produire les flux benthiques de nutriments et (ii) analysés pour déterminer leur composition physique (granulométrie, porosité), élémentaire (C, N et P), isotopique (^{13}C et ^{15}N) et moléculaire (distribution des lipides). Pour les analyses moléculaires, 180 composés de 5 familles chimiques (stérols et stanols, acides gras, alcools gras, hydrocarbures aliphatiques et hydrocarbures aromatiques) ont été identifiés dans les vasières et ont été classés en 10 sources: micro-organismes, végétaux terrestres, phytoplanctons, macroalgues vertes, microalgues benthiques, algues, macrophytes, matières fécales, produits pétroliers, produits de combustion.

Les résultats obtenus mettent en avant une large hétérogénéité de la biogéochimie des vasières le long du littoral breton. Cette hétérogénéité se manifeste à l'échelle régionale mais aussi locale, notamment dans les flux benthiques potentiels. Les données isotopiques mettent en avant un gradient géographique avec un enrichissement en ^{13}C et un appauvrissement en ^{15}N des

*Intervenant

vasières situées en milieu d'estuaire vers les vasières situées dans les baies. Les distributions des molécules sont elles aussi hétérogènes et soulignent ainsi une variabilité spatiale des contributions des sources de matière organique sédimentaire.

L'analyse statistique des données de composition de la MOS et les flux de nutriments permet d'attribuer respectivement 24% et 31% de la variance des flux de NH_4^+ et de PO_4^{3-} à l'origine de la MOS. Les flux de NH_4^+ sont corrélés à la porosité, au ^{15}N , aux marqueurs des phytoplanctons et de diesel. Ces flux sont contrôlés par l'absorption par le phytoplancton de l'azote anthropique dissous exporté par les bassins versants agricoles. Leur sédimentation est favorisée par de faibles conditions hydrodynamiques, enrichissant les sédiments en MO labile. Les flux de PO_4^{3-} sont corrélés aux teneurs en P organique et en P lié aux oxydes de fer et à la proportion de marqueurs fécaux. Ces flux sont dus à la sédimentation de particules de P exportées par l'érosion des sols agricoles.

Les sédiments de vasière sont donc de potentielles sources de flux dissous de nutriments vers la colonne d'eau. L'azote et le phosphore présents dans ces sédiments sont hérités des activités agricoles en amont dans les bassins versants. La réduction de cette source de nutriments nécessite donc une réduction des intrants azotés et phosphorés sur les bassins versants.

Distribution des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans des fractions de matière organique du sol le long d'un gradient altitudinal dans les Alpes Françaises (Lautaret, Hautes-Alpes)

Lise Marchal *¹, Noelia Garcia-Franco², David Gateuille¹, Luis Carlos Colucho Hurtarte³, Christopher Just², Emmanuel Naffrechoux¹, Martin Wiesmeier^{2,4}, Jérôme Poulenard¹

¹ Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Chair of Soil Science, TUM School of Life Sciences Weihenstephan, Technical University of Munich – Allemagne

³ Diamond Light Source Ltd., Didcot, Oxfordshire – Royaume-Uni

⁴ Bavarian State Research Center for Agriculture, Institute for Organic Farming and Agroecology – Allemagne

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des polluants organiques, persistants et ubiquistes dans l'environnement. Ils sont principalement émis dans l'atmosphère par la combustion incomplète et la pyrolyse de matière organique (MO), en particulier par le chauffage domestique et le trafic routier. Une fois libérés dans l'atmosphère, les HAP peuvent parcourir de longues distances avant de se déposer sur la végétation et les sols. De fait, les régions reculées telles que les zones de montagne ne sont pas épargnées par les contaminations.

Les HAP sont des composés hydrophobes et lipophiles qui ont tendance à persister dans les différents compartiments de l'environnement, et en particulier dans les sols. Les HAP possèdent une forte affinité pour la MO qui représente le principal support des HAP dans les sols et qui confère à ces derniers une forte capacité de rétention. Les sols agissent alors comme un compartiment de stockage pour ces contaminants. Cependant, malgré quelques études portant sur la sorption des HAP, les mécanismes de rétention de ces polluants par la matière organique des sols (MOS) restent mal compris.

Ainsi, afin d'améliorer la compréhension de leur comportement et de leur devenir dans les sols, il semble pertinent de s'intéresser à la dynamique de la MOS. La MOS peut être conceptualisée en différentes fractions, chacune ayant une dynamique propre et des temps de résidence moyens (MRT) allant de quelques jours à plusieurs centaines d'années. En particulier, le fractionnement physique est une méthode courante pour séparer le sol en trois fractions distinctes : la matière organique particulaire libre (ou *free Particulate Organic Matter* ; fPOM), la matière organique particulaire occluse (ou *occluded Particulate Organic Matter* ; oPOM) et la matière organique associée aux minéraux (ou *Mineral-associated Organic Matter* ; MaOM).

*Intervenant

Certaines études ont examiné la distribution des HAP dans les sols selon différentes fractions (fractionnement par tailles de particules et/ou densimétriques), mais toutes se sont concentrées sur des sols urbains ou sur des sols agricoles et pollués. Nos travaux ont donc cherché à explorer les teneurs en HAP et leur distribution au sein des trois fractions fPOM, oPOM et MaOM dans des sols non anthropisés. Pour ce faire, des sols de montagne (Lautaret, Hautes-Alpes) le long d'un gradient altitudinal (1920 m – 2840 m) ont été étudiés. En complément de la quantification des HAP, les teneurs en carbone organique (Corg) ont été mesurées dans chacune des fractions et des analyses en spectroscopie RMN ont été réalisées afin d'examiner les compositions des fractions fPOM et oPOM.

Nos résultats mettent en évidence une distribution préférentielle des HAP selon les fractions, avec des teneurs significativement plus élevées dans la fraction oPOM, suivie de la fraction fPOM, puis MaOM. Bien que la MOS soit le principal support des HAP dans les sols, les niveaux de Corg ne sont pas corrélés avec la concentration des HAP dans chaque fraction. Ceci implique alors que d'autres processus sont impliqués dans la sorption et la rétention des HAP.

Note : Ce résumé n'a pas fait l'objet d'une communication au séminaire ResMO 2024

Quel rôle a joué l'Atlantique tropical de l'Ouest dans les variations de l'hydroclimat et de la végétation au Nord-Est du Brésil au cours des derniers 300 000 ans ?

Louis Rouyer-Denimal * ¹, Aline Govin ², Ioanna Bouloubassi ³, Ana Luiza Spadano Albuquerque ⁴, Thanh Thuy Nguyen Tu ¹, Magloire Mandeng-Yogo ³, Christelle Anquetil ¹, Arnaud Huguet ¹

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Climat et Magnétisme – Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement [Gif-sur-Yvette] – France

³ Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques – Museum National d'Histoire Naturelle, Institut de Recherche pour le Développement, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut Pierre-Simon-Laplace – France

⁴ Universidade Federal Fluminense [Rio de Janeiro] – Brésil

La région semi-aride du Nord-Est du Brésil (NEB) est la région sèche la plus peuplée du monde avec une population atteignant 60 millions d'habitants. Les exercices de modélisation régionale de l'évolution future de l'hydroclimat du NEB s'accordent sur une aridification progressive à l'origine : (i) d'une augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse et (ii) d'une modification de la composition et de la répartition spatiale des couverts de végétation. À l'actuel, l'hydroclimat (et par extension la végétation) du NEB est principalement contrôlé par les conditions de l'Atlantique tropical et notamment sa température. En réponse au changement climatique, la température de l'océan devrait augmenter, impactant ainsi les processus qui contrôlent l'hydroclimat du NEB.

Au regard des enjeux socio-économiques du NEB, nous souhaitons améliorer notre compréhension de l'évolution de l'hydroclimat de cette zone dans un contexte de climat plus chaud. Pour cela, nous proposons d'étudier les périodes interglaciaires, qui fournissent des cas d'étude pertinents car elles sont caractérisées par un climat chaud tel que celui qui pourrait être atteint dans les décennies à venir.

Nous avons mené une étude comparative de la composition organique d'une archive sédimentaire marine (GL-1180 ; 8°S, 33°W) prélevée sur la marge NE brésilienne et d'échantillons de végétation collectés au NEB. L'objectif de ce travail est de reconstruire les variations passées de la composition de la végétation grâce à l'identification de leur signature organique par l'analyse d'échantillons modernes.

*Intervenant

Nous avons donc développé une approche multi-traceurs organiques combinant des analyses à l'échelle de la matière organique totale (%Corg, %Ntot, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{tot}}$) et moléculaire (distribution et composition isotopique $-\delta^{13}\text{C}$ - des *n*-alcanes notamment) visant à identifier les sources de la matière organique et la composition de la végétation terrestre.

Les premières analyses de la distribution des *n*-alcanes des échantillons de végétations modernes indiquent que la végétation aride du NEB est caractérisée par une forte abondance du n-C33 tandis que la forêt tropicale humide est riche en n-C29. Nous avons donc développé un indice, le " $33/29+31$ ", calculé à partir de l'abondance des *n*-alcanes à longues chaînes, permettant de différencier la matière organique produite par ces deux végétations majeures. L'application de ce traceur le long de l'archive sédimentaire a mis en lumière des covariations avec les traceurs couramment employés pour reconstruire la composition de la végétation (longueur de chaîne moyenne des *n*-alcanes et leur $\delta^{13}\text{C}$ moléculaire). La combinaison de ces trois traceurs a permis de mettre en lumière, pour la première fois, une expansion de la végétation aride (humide) au NEB au cours des périodes glaciaires (interglaciaires). De plus, les covariations entre le $\delta^{13}\text{C}$ moléculaire et des enregistrements de la température de l'Atlantique tropical de l'Ouest indiquent le rôle de l'océan adjacent dans le contrôle des variations hydroclimatiques au cours du Pléistocène tardif. D'après ces résultats, le réchauffement futur de l'Atlantique tropical induirait une humidification du NEB, en contradiction avec les projections de l'évolution de l'hydroclimat dans cette région.

Les nanoplastiques en terre inconnue

Alexandra Ter Halle * ¹

¹ Interactions moléculaires et réactivité chimique et photochimique (IMRCP) – Institut de Chimie de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut de Chimie du CNRS, Centre National de la Recherche Scientifique – bat. 2r1 RECHERCHE DE CHIMIE 118 Route de Narbonne 31062 TOULOUSE CEDEX 4, France

Presenting : Alexandra ter Halle¹, Magali Albignac¹, Jean François Ghiglione⁴, Emmanuelle Maria¹, Tiago De Oliveira¹, , Marie Henriet², Louisa Landebrit¹, Frédéric Violleau², Gaetane Lespes³, Clément Roux¹, Anne-Françoise Mingotaud¹,

Affiliations :

1 Laboratoire Softmat, Université de Toulouse, CNRS UMR 5623, Université Toulouse III – Paul Sabatier.

2 Toulouse FFF Center TFFFC, Université de Toulouse, INP PURPAN, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, Toulouse, France

3 Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, IPREM, UMR 5254, 2 Avenue Pierre Angot, 64053 Pau Cedex, France

4CNRS, Sorbonne Université, Laboratoire d'Océanographie Microbienne (LOMIC), UMR 7621, Observatoire Océanologique de Banyuls, Banyuls sur mer, France

Les preuves récentes de la présence de nanoplastiques dans la nature mettent en lumière leur potentiel impact sur l'environnement et la santé humaine. Les nanoplastiques ont des propriétés très distinctes des débris de plastiques à l'échelle macroscopique. Citons en particulier la forte réactivité des nanoplastiques. La structure et la réactivité des nanoplastiques dans le milieu naturel est peu appréhendée mais nos connaissances dans le domaine des sciences des nanomatériaux nous indiquent que les nanoplastiques dans les matrices environnementales se lient certainement à d'autres colloïdes, probablement des nanomatériaux naturels. Par exemple, dans les eaux naturelles, en plus d'interagir avec des molécules organiques dissoutes (naturelles ou polluantes) et des ions (naturels ou non), les nanoplastiques peuvent se lier à des colloïdes tels que des particules d'argile ou de la matière organique colloïdale.

Nous présenterons comment une caractérisation physico-chimique mutli-échelle des échantillons de rivière pourrait mettre en lumière l'organisation supramoléculaire des nanoplastiques dans les eaux naturelles. En termes de quantification, l'extraction et de la caractérisation des nanoplastiques est discuté, en particulier au regard du contrôle qualité.

En conclusion, nous discuterons de l'utilité d'intégrer l'organisation supramoléculaire des nanoplastiques lors de l'appréhension des processus de transport et transformation dans le milieu naturel, ainsi que leur impact sur les aspects toxicologiques.

*Intervenant

Macroplastiques dans le continuum Terre-Mer : vers la reconstitution de trajectoires socio-environnementales ?

Romain Tramoy * ¹, Bruno Tassin ², Lauriane Ledieu ³, Rachid Dris ²,
Johnny Gasperi ³

¹ Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) – Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – 6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs sur Marne 77 455 Marne-La-Vallée Cedex 2, France

² Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains – Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – France

³ Laboratoire Eau Environnement – Université Gustave Eiffel – France

Les débris plastiques, grands et petits, constituent l'une des menaces majeures pour les écosystèmes. Les microplastiques (< 5 mm) sont d'ailleurs constitutifs de ce que Person et al. (2022) ont appelés les " entités nouvelles ", dont la frontière planétaire aurait doré et déjà été franchie, du fait de la diversité, de la quantité, de l'ubiquité dans l'environnement et de la dynamique de production exponentielle de ces entités nouvelles. Or, il s'avère aujourd'hui extrêmement difficile de renverser la tendance, tant les plastiques sont partout dans le quotidien et quasiment dans toutes les sociétés humaines. Les macroplastiques (> 5 mm), par leur fragmentation, génèrent par ailleurs des microplastiques de la production jusqu'au post-usage, *a fortiori* lorsqu'une partie d'entre eux se retrouve dans l'environnement en-dehors de tout système de gestion. Mais, leur résistance physico-chimique – ils sont conçus pour cela – leur confère souvent la capacité de garder les attributs de leur usage, devenant ainsi petit à petit les fossiles de l'Anthropocène. L'étude de leur source, dynamique de transport, ainsi que leur caractérisation fine permet de reconstruire les trajectoires socio-environnementales d'un territoire, afin de dessiner des trajectoires futures qui soient compatibles avec les frontières planétaires, grâce aux politiques publiques. Dans le cadre de cette présentation, nous allons aborder les travaux qui ont été menés sur le bassin de la Seine depuis 2017 et portant sur la mesure des flux de macrodéchets et de leur typologie de la zone urbaine à l'estuaire. Leur implication en termes de politiques publiques sera discutée à la lumière des propositions qui émanent du " traité mondial de lutte contre la pollution plastique, juridiquement contraignant et fondé sur une approche globale couvrant l'ensemble du cycle de vie des plastiques ".

*Intervenant

Assainir la ville sans contaminer l'environnement : tout-à-l'égout et séparation à la source face au risque sanitaire lié aux matières fécales

Paul Minier * ¹

¹ Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains – Ecole des Ponts ParisTech – France

Le développement de systèmes d'assainissement permettant une valorisation avancée des excréments humains n'est envisageable que s'ils sont considérés comme sûrs vis-à-vis du risque infectieux entérique (RIE). Notre recherche vise à contribuer à cette question de santé publique, en analysant la maîtrise du RIE dans la gestion des matières fécales par le tout-à-l'égout et par les techniques de séparation à la source.

De nos jours, le tout-à-l'égout (TAE), système dominant en France et dans les pays industrialisés, est considéré comme une filière " sûre " si les eaux usées sont acheminées vers une station de traitement. Cependant, celles-ci ne sont généralement pas astreintes à des objectifs sanitaires sur les eaux rejetées. En évacuant le risque fécal des zones urbaines densément peuplées, le TAE limite la contamination intra-urbaine, mais il déplace ce risque vers l'environnement. Cette gestion induit un fort risque de santé publique pour les usagers du milieu récepteur situés en aval du rejet. Dans de nombreux pays industrialisés comme la France, d'autres barrières sont alors présentes pour le limiter (traitement de l'eau de consommation, restrictions de baignade, interdiction de vente de coquillages, système de santé performant, etc.).

Nous montrons que, depuis son développement à partir de la fin du XIX^e siècle, l'efficacité sanitaire du TAE dans la gestion des matières fécales manque de preuves précises de son efficacité, notamment en raison de la concomitance avec d'autres facteurs, comme l'alimentation en eau et d'un contexte général d'amélioration de la santé et de transition épidémiologique. Il a même pu avoir des effets négatifs à l'échelle du territoire dans les contextes où le traitement de l'eau potable a été introduit tardivement. La maîtrise du RIE ne repose donc pas sur l'établissement d'une barrière entre les déjections humaines et l'environnement (ce que l'on pourrait appeler l'assainissement), mais sur le maintien d'une barrière entre un environnement contaminé et les différents usages de l'eau, en particulier l'eau potable.

L'analyse qualitative du risque biologique de systèmes d'assainissement par séparation à la source déployés en France et en Suisse nous pousse à croire que ces systèmes d'assainissement pourraient permettre de limiter la transmission des maladies infectieuses entériques si l'ensemble de la chaîne de gestion est géré de manière adéquate. Ces systèmes d'assainissement, devenus particulièrement pertinents dans un monde en changement global et en risque de désescalade énergétique, pourraient alors être une solution de gestion des matières fécales autant, voire davantage, "sûre" que le TAE. Une analyse plus complète des voies actuelles de transmission et des risques futurs posés par les maladies infectieuses entériques, ainsi que des conséquences sanitaires des différents systèmes d'assainissement, non seulement à l'échelle urbaine, mais aussi à l'échelle plus large de toutes les communautés impactées reste à être menée.

*Intervenant

Thème 2 : Matières organiques extra-terrestres et précambriennes



La Géobiotropie

Marie-Paule Bassez * ¹

¹ Fondation Jean-Marie Lehn – Université de Strasbourg – France

Il est proposé que des microorganismes vivaient déjà au temps archéen, mais leur origine n'est pas expliquée. L'importance de considérer la structure de l'eau dans la formation de molécules organiques d'intérêt biologique est présentée ici.

En 1996, N. Holm suggère que des molécules organiques peuvent se former suite au processus de serpentisation. Des expériences de laboratoire démontrent qu'un mélange gazeux de CO, N₂/NH₃, H₂/H₂O, excité à 300°C, 370°C ou par rayons cosmiques, produit des molécules organiques azotées (Kobayashi 1990-2008, Hill et Nuth 2003, Pizzarello 2012). La présence de CO semble requise. En 2009, Fu et Seyfried observent CO et un peu de CH₄ quand H₂ et CO₂ sont dissous dans l'eau de mer à 250°C-300°C et 25 MPa, en présence de Fe₃O₄. Ce sont les conditions d'une eau proche de l'état supercritique. La question est: comment obtenir CO en grande concentration dans un environnement géologique ?

L'analyse à fort pH, du diagramme d'oxydo-réduction du système Fe-eau, dessiné par Cook et Olive (2012), indique que Fe^{II} s'oxyde en Fe^{III} avec émission de H₂ à 300°C-350°C, 10-25 MPa, pH 11-14. Dans ces conditions, des silicates de fer ferreux peuvent se transformer en silicates et oxydes de fer ferrique, par l'action d'une eau anoxique de faible densité, 700-600 kg/m³ (Bassez 2013-2023). Par exemple, la fayalite Fe₂SiO₄ s'hydrolyse avec formation d'hématite Fe₂O₃, de quartz SiO₂ et d'hydrogène H₂ (Bassez 2018). Le quartz se forme avec des cavités internes, appelées inclusions fluides. L'eau de mer archéenne terrestre contenait du CO₂, était anoxique et pouvait être localement très basique et dans un domaine (T,P) proche de l'état supercritique. Elle contenait du N₂ puisque l'atmosphère archéenne en contenait (Marty et al. 2013). Le processus suivant est envisageable: l'oxydation du fer ferreux avec émission de H₂ se produit dans l'eau archéenne au contact de roches silicatées contenant du fer ferreux. Les cavités du quartz, lieux de concentration des molécules, contiennent ainsi H₂O proche de l'état supercritique, H₂, CO₂ et N₂. Le monoxyde de carbone CO et des molécules organiques azotées sont synthétisées. Au cours du temps, des fissures dans les roches libèrent les molécules qui ensuite se complexifient jusqu'à l'émergence de la vie.

Le processus de formation de molécules organiques d'intérêt biologique, sur Terre et dans certains objets extra-terrestres, nécessitant l'interaction de silicates de fer ferreux et d'une eau anoxique, très basique et proche de l'état supercritique, est représenté par le concept de géobiotropie (Bassez 2016). Des observations de molécules organiques dans des cavités de roches de 3.2 Ga et 3.4 Ga de la région archéenne de Barberton, Afrique du Sud, sont en ce moment à l'étude.

Les auteurs cités sont référencés dans :

Bassez MP (2018) 10.1007/s11084-018-9560-y (2023)
10.1007/s11084-023-09638-x accès libres

*Intervenant

Matière organique d'origine cométaire dans une matrice astéroïdale ? Aperçu chimique et isotopique du continuum astéroïde-comète.

Laure Bejach ^{* 1}, Jérémie Mathurin ², Julien Rojas ³, Cécile Engrand ⁴, Jean Duprat ⁵, Emmanuel Dartois ⁶, Alexandre Dazzi ², Deniset-Besseau Ariane ², Smail Mostefaoui ⁵, Jianhua Wang ³, Lucie Delauche ⁴

¹ IJCLab – CNRS, Université Paris Sud, Université Paris Saclay – France

² Institut de Chimie Physique – Institut de Chimie - CNRS Chimie, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Carnegie Institution for Science – États-Unis

⁴ Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie – Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR9012, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ Cosmochimie [IMPMC] – Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – France

⁶ Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay – Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Astéroïdes et comètes ont été historiquement différenciés par leur trajectoire (circulaire et stabilisée entre Mars et Jupiter pour les astéroïdes, elliptoïdale et allant jusqu'à au-delà de l'orbite de Neptune pour les comètes), et par les glaces rémanentes uniquement à la surface des comètes. Cependant, certains objets cométaires et astéroïdaux présentent des caractéristiques communes (trajectoire, glace, activité cométaire), ce qui suggère un continuum plutôt qu'une dichotomie. Ces objets ayant une origine extrêmement ancienne, l'étude de leur composante carbonée permet d'avoir un aperçu sur les conditions de formation primordiales de la matière organique, sur son évolution, ainsi que sur les conditions physico-chimiques du début du système solaire. Les analyses à l'échelle sub-micrométrique de matériaux extraterrestres, comme les chondrites carbonées ou les échantillons de l'astéroïde Ryugu rapportés par la mission spatiale Hayabusa 2, ont révélé une grande diversité chimique et isotopique de leur matière organique, ce qui traduit une histoire riche et complexe (Kebukawa et al., 2019 ; Mathurin et al., 2023 ; Yabuta et al., 2023).

Les micrométéorites sont la principale source de matière extraterrestre sur Terre, avec un apport à la surface ~5 200 tonnes par an (Rojas et al., 2021). Les modélisations prédisent que ces poussières proviennent principalement de comètes (~80%) et, dans une moindre proportion (~20%) des astéroïdes (Nesvorny et al., 2010, 2011).

La présente étude se concentre sur la caractérisation à l'échelle submicrométrique d'une micrométéorite, non fondue lors de l'entrée atmosphérique, et constituée principalement de phyllosilicates dans lesquels la matière organique est présente. La similarité de la minéralogie de cette micrométéorite avec celle des chondrites carbonées " primitives " et des échantillons de l'astéroïde

*Intervenant

carboné Ryugu (non altérés par l'entrée atmosphérique) suggèrent une origine astéroïdale. Pour tester cette hypothèse, nous avons effectué des analyses nanospectroscopiques infrarouge (AFM-IR) et des analyses isotopiques de H, C et N (NanoSIMS) avec une résolution spatiale de quelques centaines de nanomètres sur une micrométéorite pressée entre deux fenêtres diamant. La répartition de la matière organique est hétérogène et se présente sous forme de patches bien distincts de la matrice, et sous forme diffuse intimement liée à la matrice de phyllosilicates. Les spectres AFM-IR révèlent une contribution majeure de carbones aromatiques C=C, de carbonyles C=O et d'aliphatiques CH_x. Qu'elle soit sous forme de patch ou diffuse, la matière organique a une composition généralement assez similaire, c'est-à-dire dominée par les C=C, avec des contributions plus faibles de C=O et CH_x. Les proportions varient toutefois localement. Les analyses NanoSIMS ont révélé des appauvrissements en ¹³C ($-240 \pm 34 \text{ ‰} < \delta^{13}\text{C} < 45 \pm 40 \text{ ‰}$), ainsi que des enrichissements significatifs en ¹⁵N ($\delta^{15}\text{N}$ jusqu'à $+1\,000 \text{ ‰}$) et en deutérium (δD jusqu'à $10\,438 \pm 470 \text{ ‰}$). Ces enrichissements en D et ¹⁵N étant comparables à ceux trouvés dans la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (Paquette et al., 2021), et la minéralogie étant similaire à celle d'astéroïdes carbonés, ces résultats interrogent sur les mécanismes de formation cométaires et astéroïdales. Comment et à quel moment s'est formée la matière organique ? Comment et quand est-elle incorporée dans la matrice des corps ?

Par ailleurs, nous avons analysé par NanoSIMS un patch d'environ $1 \mu\text{m}$ précédemment analysé par AFM-IR, ce qui confirme la possibilité de corréler les analyses chimiques et isotopiques à une résolution spatiale de quelques centaines de nanomètres.

Matière organique et roches anciennes

Sylvain Bernard * ¹

¹ Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC) – Muséum National d’Histoire Naturelle (MNHN), Sorbonne Université UPMC Paris VI, Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS : UMR7590, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR206 – France

La matière organique des roches anciennes, terrestres ou extraterrestres, est riche en informations sur l’histoire de ces roches. Mais pour décoder proprement le message porté par la matière organique, il convient de déterminer sa nature chimique originale, i.e. la nature des composés organiques qui étaient présents au moment de la formation de la roche, avant son histoire géologique. Cela nécessite de documenter la structure moléculaire des matériaux organiques des roches anciennes et de déterminer/quantifier la nature et l’ampleur des transformations qu’ils ont subies. En d’autres termes, une compréhension fine des processus clés impliquant le carbone organique (biogénique ou abiotique) est nécessaire pour décoder correctement les archives géologiques anciennes terrestres ou extraterrestres. Ces dernières années, de nouvelles méthodologies ont permis de mieux documenter la structure moléculaire des composés organiques des roches anciennes, fournissant ainsi des indices uniques sur leur origine. Les études de roches ayant subi différents degrés d’altération et de maturation ont offert un nouveau regard sur les processus impliquant le carbone organique. En parallèle, les approches expérimentales ont apporté de nouvelles contraintes sur l’impact d’une histoire géologique sur ces matériaux. Tous ces travaux ont permis de mieux discuter la biogénicité de microstructures anciennes et de proposer de nouvelles hypothèses concernant les processus ayant eu lieu sur les corps parents des météorites. Tous ces travaux permettent d’envisager sereinement la recherche de traces organiques de vie sur les corps planétaires de notre Système Solaire.

*Intervenant

Evolution de la signature D/H des acides aminés en contexte astéroïdal

Yuanyuan He ^{*1}, Laurent Remusat ^{*1}, Marceau Lecasble ¹, Nadezda Khodorova ¹, David Boulesteix ², Arnaud Buch ², Sylvain Bernard ¹

¹ Research On Carbon-rich Key Samples [IMPIC] – Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – France

² Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay – France

Environ une centaine d'acides aminés extraterrestres ont été identifiés dans les chondrites carbonées, avec des concentrations allant de quelques ppm à plus de 300 ppm. Ces molécules ont probablement été apportées à la surface de la Terre primitive et peuvent donc avoir influencé l'émergence de la vie. La distribution des acides aminés peut être liée aux processus de synthèse pré-accrétionnels et aux processus secondaires qui ont affecté les corps parents (altération aqueuse ou métamorphisme thermique). Les compositions isotopiques indiquent des précurseurs formés à basse température dans un environnement interstellaire ou nébulaire avant l'accrétion du corps parent, car ils présentent les plus grands enrichissements en D parmi les constituants organiques des chondrites carbonées. Néanmoins, les compositions isotopiques D/H des acides aminés s'étendent sur une large gamme de valeurs ; par exemple, $360\text{‰} < \delta D < 3400\text{‰}$ pour Murchison (chondrite de type CM2) ou $1000\text{‰} < \delta D < 7000\text{‰}$ pour la chondrite de type CR2 EET92042. Cette large gamme peut être liée à leur voie de synthèse et à leurs précurseurs, ou à une meilleure préservation de leur signature isotopique au cours de l'évolution du corps parent survenue quelques millions d'années après leur accrétion.

Pour tester cette dernière hypothèse, une meilleure compréhension de l'évolution du δD des acides aminés dans des conditions d'altération sur les astéroïdes est nécessaire. Nous présentons ici une étude expérimentale de la cinétique de l'échange isotopique entre l'eau et les acides aminés à 150°C. Nous avons également identifié les sites moléculaires les plus sensibles à l'échange D-H afin d'interpréter comment la structure moléculaire influence la préservation des valeurs δD .

L'évolution des isotopes du D/H de six acides aminés (glycine, α - et β -alanine, acide aminoisobutyrique, acide γ -aminobutyrique et isovaline) en condition d'altération aqueuse a été étudiée expérimentalement à 150 °C pendant 1, 10 et 21 jours en présence d'eau à différentes valeurs de δD . Les sites préférentiels pour l'échange H-D ont été identifiés grâce à des expériences en présence de D₂O et par analyse en GC-MS. Nos résultats ont montré que l'hydrogène en position α des acides aminés est sujet à un échange rapide ; les acides aminés sans α -hydrogène ne présentent aucun échange significatif. Par exemple, la glycine avec 2 atomes d'H en α montre un échange significatif et rapide contrairement à l'isovaline (pas d'hydrogène en α).

La cinétique des échanges isotopiques a été étudiée grâce à des expériences en présence d'eau pauvre en D (SLAP2, $\delta D = -427\text{‰}$) et riche en D (IAEA 605, $\delta D = 6000\text{‰}$) et analyse par GC-irMS. Nos données montrent que plus la chaîne carbonée est courte, plus l'échange est rapide. Par conséquent, les acides aminés à longue chaîne et les acides aminés ramifiés sans hydrogène en α devraient mieux préserver leur D/H que les acides aminés courts. Le comportement différent des acides aminés sous altération aqueuse peut expliquer en partie la large gamme de compositions isotopiques observées dans des chondrites carbonées.

*Intervenant

Interactions matière organique et phyllosilicates dans les météorites: analyse nano-échelle in situ par MET ET XANES.

Corentin Le Guillou * ^{1,2}, Sylvain Bernard ³, Hugues Leroux ²,
Bahae-Eddine Mouloud ², Maya Marinova ², Damien Jacob ², Sylvain
Laforet ², Adrien Teurtre ², Francisco De La Peña ², Mario
Pelaez-Fernandez ²

¹ Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 – Centre National de la Recherche Scientifique :
UMR8207, Université de Lille – France

² Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 – Centrale Lille, Institut de Chimie - CNRS Chimie,
Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour
l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

³ Research On Carbon-rich Key Samples [IMPIC] – Institut de minéralogie, de physique des matériaux
et de cosmochimie – France

Les météorites appelées chondrites carbonées sont vieilles de 4,5 Milliards d'années, ce sont les roches les plus anciennes du système solaire. Elles contiennent, parmi de nombreuses autres phases minérales, un mélange de matière organique (MO) et de phyllosilicates intriqués à l'échelle nanométrique. Cet assemblage est le résultat de l'accrétion de molécules organiques précurseurs, d'eau et de silicates anhydres, suivie de réaction d'altération hydrothermale à basse température (< 250°C). Depuis 2021, nous avons concentré nos efforts sur l'analyse des échantillons de l'astéroïde Ryugu, ramenés par la sonde spatiale japonaise Hayabusa2 (JAXA) afin de comprendre quelle rôle cette altération a joué sur l'évolution de la MO.

Pour remonter à la nature des précurseurs organiques et inorganiques, et de contraindre les conditions d'altération au sein des astéroïdes, nous mettons en œuvre un ensemble de techniques analytiques in situ à la nano-échelle. La micro-spectroscopie d'absorption X au seuil du carbone (source synchrotron) donne accès à la signature moléculaire de la matière organique. Nous avons notamment développé des calibrations permettant de quantifier les concentrations de certains groupements fonctionnels. Ces données sont ensuite couplées à la microscopie électronique à transmission. Au delà de l'imagerie, nous avons mis au point des approches quantitatives pour mesurer les rapports N/C, O/C et S/C de la MO en EDS et cartographier ainsi son hétérogénéité chimique et les liens éventuels avec l'environnement minéralogique. L'émergence récente des détecteurs à électrons direct nous a aussi conduit à développer également des analyses 4D-STEM. Le faisceau est scanné sur l'échantillon (2D) et en chaque pixel, un cliché de diffraction électronique (2D) est enregistré. Ceci permet de produire des cartes à partir des informations structurales, permettant par exemple d'imager la répartition des polytypes de la serpentine, ou encore celle des distances interfoliaires des smectites.

Ce travail nous révèle que la matière organique est composée de deux pôles distincts. Des particules individuelles de quelques centaines de nanomètres, plus riches en groupements aromatiques

*Intervenant

et une MO diffuse, plus aliphatique. Celle-ci est associée préférentiellement aux smectites, et sans doute présente au sein même des espaces interfoliaire. Ces résultats pointent le rôle important des interactions physico-chimiques MO-silicates-eau dans l'évolution des signatures moléculaires de la matière organique qui doivent être prise en compte pour remonter à l'origine des matériaux à partir desquels le système solaire s'est formé.

Hétérogénéité des compositions chimique et isotopique des " bitumes " Paléoprotérozoïques des gisements d'uranium du Saskatchewan : une composition " extra-terrestre " dans un monde bien terrestre.

Raymond Michels * ¹, Laure Sangely ¹, Marc Chaussidon ², Marc Brouand ³, Michels Cuney ¹

¹ GeoRessources UMR 7359 – GeoRessources, UMR 7359 CNRS-UL – France

² Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques – Institut National des Sciences de l'Univers, Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ ORANO – Orano Group – France

Le bassin d'Athabasca d'âge paléoprotérozoïque (-2500 à -1600 My) est situé dans la province du Saskatchewan au Canada. Ce bassin renferme environ 1800m de sédiments principalement silicoclastiques et contient un des plus grands gisements d'uranium du monde. Les concentrations d'uranium se rencontrent associées à des structures faillées riche en graphite qui s'étendent des profondeurs du socle jusqu'à la base de la série sédimentaire. La mise en place du gisement a été accompagnée de circulations fluides qui ont très fortement altéré les roches à l'interface socle-sédiments. Parmi les éléments minéraux qui constituent la paragenèse caractéristique de ce milieu se trouvent des objets sphériques de moins de 2mm de diamètre appelées " bitumes " dans la littérature. La composition chimique et isotopique de ces dernières a été caractérisées à l'échelle micrométrique. Ainsi, des sections polies ont été analysées 1) par la microspectroscopie infra-rouge à transformée de Fourier afin de déterminer leur aliphaticité 2) par microsonde ionique pour déterminer leur composition isotopique en carbone. L'analyse par micro-spectroscopie infra-rouge indique une variabilité de contribution des bandes caractéristiques des fonctions aliphatique /aromatiques/oxygénées qui s'organise du centre vers les bordures des sphérules selon une aliphaticité décroissante de 0.7 à 0.3 en rapport relatif. Les mesures isotopiques exprimées en delta 13C varient de 10‰ à 20‰ du centre vers le bord selon les sphérules. Les mesures sur une population de sphérules indique une variation de composition isotopique atteignant une variation de -50‰ à -30‰. Ces fortes variations chimiques et isotopiques sont peu communes d'autant plus que leurs évolutions conjointes sont à l'opposé de ce qui est observé pour des bitumes d'origine pétrolière. En comparaison avec la littérature ces caractéristiques sont plutôt observées pour les matières organiques d'origine extra-terrestres. Ceci interroge sur la nature et le mécanisme de formation de ces objets carbonés dans le contexte de la mise en place des gisements uranifères.

*Intervenant

Origine et évolution de la fraction organique aromatique dans les chondrites carbonées

Laurent Remusat ^{*1}, Marceau Lecasble ¹, Boris Laurent ¹, Sylvain Bernard ¹

¹ Research On Carbon-rich Key Samples [IMPMC] – Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – France

Les chondrites carbonées sont souvent considérées comme les réservoirs des premières molécules organiques délivrées sur la Terre prébiotique. Elles peuvent contenir jusqu'à 4 % en poids de matière organique, qui est dominée par du carbone aromatique. En effet, la fraction organique dominante est une macromolécule insoluble (IOM) constituée de petites unités aromatiques interconnectées par des chaînes aliphatiques courtes et ramifiées. Les chondrites contiennent également des hydrocarbures aromatiques polycycliques libres. Les HAP constituent les molécules emblématiques du milieu interstellaire et des nuages moléculaires. Le lien entre les HAP de l'ISM et les unités aromatiques des chondrites carbonées reste débattu. Les isotopes du carbone et de l'hydrogène constituent un outil précieux pour décrypter l'origine des composés organiques dans chondrites carbonées mais leur évolution au cours de l'histoire géologique subie par le corps parent est mal contrainte. Nous avons étudié les HAP solubles et l'IOM de Mukundpura, Aguas Zarcas et Kolang, trois chondrites carbonées de type CM montrant des degrés croissants d'altération aqueuse. Ces météorites sont supposées provenir du même corps parent que les chondrites de Murchison et de Paris. Nous avons également soumis des HAP à des expériences en conditions hydrothermales pour étudier comment les processus astéroïdaux, ici l'altération aqueuse, peuvent affecter leurs caractéristiques moléculaires et isotopiques.

Jusqu'à 35 ppm de HAP solubles sont détectés dans les chondrites CM, leur taille allant de 1 à 7 cycles aromatiques. Leur composition isotopique en carbone est cohérente avec une synthèse pré-accrétionnelle en phase gazeuse, soit dans le nuage moléculaire parent, soit dans la nébuleuse protosolaire. Cependant, leur composition isotopique en hydrogène montre une déplétion significative en D par rapport à d'autres molécules dans les mêmes chondrites. C'est probablement le résultat d'un échange isotopique avec l'eau appauvrie en D qui a circulé sur les corps parents. Des expériences à 150°C montrent que les HAP sont stables mais que les compositions isotopiques en hydrogène sont fortement influencées par échange avec l'eau.

Les IOM isolées des mêmes météorites présentent une structure moléculaire similaire à celle des chondrites de Paris et de Murchison, bien que la fraction relative de carbone aromatique augmente aux dépens des fragments aliphatiques lors d'une altération aqueuse. L'altération provoque également la perte d'hétéroéléments. Contrairement aux HAP libres, la signature isotopique en hydrogène de l'IOM n'est que légèrement affectée par l'altération aqueuse. Ceci est confirmé par des expériences réalisées dans des conditions hydrothermales à 150°C.

Dans l'ensemble, la structure moléculaire des fragments aromatiques des chondrites CM est peu affectée par l'altération aqueuse du corps parent. Cependant, les HAP solubles perdent

*Intervenant

ainsi la signature du D/H de leur environnement de synthèse. De son côté, l'IOM constitue un enregistrement plus robuste du D/H de ses précurseurs, conséquence probable de sa nature hydrophobe. Les deux composants riches en aromatiques sont probablement hérités d'une synthèse en phase gazeuse, dans le nuage moléculaire ou lors des premiers événements de la formation de notre système solaire.

Assessing biological innovation and trends in Earth's oxygenation using the nitrogen isotopic compositions of Precambrian organic matter

Christophe Thomazo *^{1,2}, Alice Pellerin *¹

¹ Biogéosciences [UMR 6282] – Université de Bourgogne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Institut Universitaire de France – Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche – France

Nitrogen is a chemical element present in all of Earth's geological reservoirs (core, mantle, crust), and dinitrogen (N₂) is the dominant gas in the Earth's atmosphere. Nitrogen is also a fundamental element of life since it is an integral part of the major molecules that make up the "building blocks" of life, such as amino acids and nucleic acids, the elementary unit of proteins and DNA. Moreover, insufficient nitrogen inputs restrict the growth of organisms, limiting primary productivity. Indeed, marine organic matter contains on average 106 atoms of carbon for 16 atoms of nitrogen and one atom of phosphorus (Redfield ratio). Nitrogen is therefore an essential nutrient which, along with phosphorus and iron, controls biological activity on Earth. The nitrogen isotopic signature preserved in sedimentary rocks has become one of the standard tools for investigating the early evolution of the biosphere together with redox changes in the ocean. Because each fixed N species (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻ and organic N) has a specific redox state and most pathways of the N-biogeochemical cycle are redox-controlled, nitrogen is an excellent marker of the redox state of ecosystems, indicating whether oxygen is present and stable in the environment.

Specifically, the nitrogen isotope composition of sedimentary organic matter has been used for more than two decades to uncover the evolution of the biogeochemical nitrogen cycle and has been interpreted as showing: (i) an early rise of diazotrophy and iron-dependent annamox metabolisms during the Paleoproterozoic (Stüeken et al., 2015; Pellerin et al., 2023) and (ii) a Neoproterozoic rise of coupled nitrification-denitrification pathways associated with increasing oceanic oxidants budget several hundreds of millions of years before the Great Oxidation Event (GOE) (Ader et al., 2016). Yet, the Precambrian $\delta^{15}\text{N}$ record does not clearly show significant changes across the GOE.

We present an extensive Precambrian $\delta^{15}\text{N}$ database spanning from the early Archean to the late Proterozoic (i.e. 3.8 Ga to 540 Ma). Using statistical methods applied to geochemical time series on this compilation, we evaluate the impact of the $\delta^{15}\text{N}$ phase (kerogen N vs. bulk N, i.e. organic matter and ammonium within phyllosilicates), the lithology (shales, carbonates, cherts and Banded Iron Formations), and metamorphism.

*Intervenant

Overall, the available Precambrian $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed}}$ record shows a distribution roughly similar to that of the present ocean, but several "events" are suggested. Notably, we report a step change from +1 to +3‰ in the mode of the $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed}}$ distributions at ca. 2.7 Ga and transient occurrences of extremely ^{15}N -enriched signatures at 2.7 and 1.9 Ga. These shifts most probably reflect the evolution of nitrogen and carbon redox cycling in surface environments. They are in good agreement with independent geochemical tracers of Earth's ocean and atmosphere stepwise oxygenation through the Precambrian. This analysis reinforces the overlooked potential of deep time organic matter nitrogen isotopes to better understand Early Earth evolution.

Ader, M. *et al.* Interpretation of the nitrogen isotopic composition of Precambrian sedimentary rocks: Assumptions and perspectives. *Chemical Geology* **429**, (2016).

Stüeken, E. *et al.* Isotopic evidence for biological nitrogen fixation by Mo-nitrogenase at 3.2 Gyr. *Nature* **520**, (2015).

Pellerin, A. *et al.* Iron-mediated anaerobic ammonium oxidation recorded in the early Archean ferruginous ocean. *Geobiology* **21**, (2023).

Thème 3 : Du terrain au laboratoire



La modélisation du spectre visible peut-elle aider à la quantification colorimétrique de biopolymères en milieu complexe ? Cas du dosage à l'anthrone pour des extraits de sols.

Emmanuelle Baudu ¹, Yassine Nait-Chabane ¹, Vincent Bustillo ²,
Claire-Emmanuelle Marcato-Romain * ¹

¹ Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaire et Environnementale – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut Universitaire de Technologie - Paul Sabatier – France

² Centre d'études spatiales de la biosphère – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

Si le concept de biofilm est utilisé depuis quelques décennies dans le domaine de l'eau, il n'est apparu qu'au cours de la dernière décennie pour l'étude des sols avec un modèle de structure des agrégats du sol incluant les Substances Extracellulaires Polymériques (EPS) sécrétées par les microorganismes. De plus en plus d'études utilisent l'extraction et la quantification biochimique des EPS pour contribuer à la compréhension du fonctionnement biologique des sols (Redmile-Gordon et al., 2020).

Cependant, des travaux antérieurs ont montré combien il est délicat de quantifier précisément les polysaccharides ou les protéines dans des milieux complexes tels que les eaux usées (Le et al., 2016; Le and Stuckey, 2016), notamment du fait de la présence de substances colorées pouvant être réactives ou non, et le besoin de méthodes analytiques demeure. Le dosage à l'anthrone a déjà été miniaturisé et adapté au LBAE pour quantifier, en un seul dosage, le sucres neutres et chargés (Rondel et al., 2013).

Ce travail propose ainsi une nouvelle adaptation du dosage des polysaccharides à l'anthrone permettant la prise en compte de la couleur des échantillons liée aux composants interférents, tels que les substances humiques des sols.

Dans un premier temps, le dosage à l'anthrone a été appliqué sur des gammes étalons de glucose, acide glucuronique et acide humique, pures ou en mélange, et l'absorbance mesurée entre 350 et 800 nm. Deux modèles ont ensuite été établis pour déterminer les concentrations : (i) un système à trois équations et 3 inconnues utilisant une longueur d'onde spécifique pour un étalon ; (ii) une modélisation du spectre visible pour les longueurs d'onde comprises entre 452 et 666 nm. Les 2 modèles ont permis de bien estimer les concentrations en glucose, acide glucuronique et acide humique.

Puis les modèles ont été appliqués à des sols. Pour cela, 4 prélèvements ont été réalisés en intra-parcellaire sur des zones cultivées ou enherbées, sur un site expérimental piloté par le CESBIO

*Intervenant

et le LEFE. Les sols ont été tamisés et une extraction chimique séquentielle des EPS a été réalisée en deux temps (Redmile-Gordon et al., 2020) : (i) lavage au tampon phosphate (PBS) ; (ii) résine échangeuse de cation (CER). Le dosage à l'antrone a ensuite été réalisé sur tous les extraits montrant que les polysaccharides et les substances humiques sont peu ou pas extraits par le lavage en PBS puis sont co-extraits grâce à la résine échangeuse de cations, en plus grande quantité dans les sols enherbés que les sols cultivés.

Évaluation agronomique et écologique des coques de cacao par compostage direct dans des fosses couvertes de plastique en vue de leur utilisation comme engrais organique pour les cacaoyers et d'autres cultures

Jean Baptiste Biloa * ¹

¹ Université de Yaoundé I – Cameroun

La baisse de la fertilité des sols sous cacaoyers est à l'origine d'une mauvaise production qui conduit aujourd'hui les agriculteurs à recourir aux engrais chimiques. Ces derniers polluent et dégradent le sol. L'objectif de ce travail était d'intégrer la fertilisation organique en valorisant le compost de coques de cacao par une méthode de compostage simple et intelligente réalisable par les cacaoculteurs. La technique de compostage a été réalisée par la mise en place de trois fosses de 12 m³ chacune. La fosse a été recouverte de plastique pour éviter le contact des coques de cacao avec le sol. Après l'écabossage, les coques de cacao ont été introduites dans la fosse et tous les 20 cm, de la terre noire a été versée sur une épaisseur de 2 cm. Après avoir rempli la fosse, celle-ci est scellée avec le même plastique et tous les 30 jours, la fosse est ouverte, le compost est retourné et refermé. Après 4 mois, le compost est retiré et étalé sur une bâche jusqu'à ce qu'il sèche complètement. Des analyses chimiques, biochimiques et physiques ont été effectuées pour évaluer la qualité et la phytotoxicité de ce compost. Les résultats obtenus ont donné les valeurs NPK Ca Mg suivantes : N : 0,77% ; P : 0,135% ; 3,03% ; Ca : 0,45% ; Mg : 0,5%. Le rapport C/N est de 8,13 %, ce qui montre que ce compost est très mûr et considéré comme un engrais. Les oligo-éléments métalliques (Cu : 73.4 mg/kg ; Zn : 102.56mg/kg ; Mn : 1069.2 mg/kg ; Fe : 49245 mg/kg) ont des niveaux acceptables qui ne peuvent pas causer de phytotoxicité chez les cacaoyers. Avec un indice de germination de 79%, ce compost est de bonne qualité et non toxique pour l'environnement. L'identification de la population fongique par analyse biochimique a permis de dénombrer les champignons suivants : *Aspergillus*, *Pencilium*, *Geotridium*, *Fusarium*, *Levures*. L'absence de *phytophthora* dans ce compost montre que cette méthode devrait être vulgarisée car la température et l'activité microbienne détruisent ce vecteur de la pourriture brune et noire. Au vu de ce qui précède, ces résultats montrent la qualité et la maturité du compost de coques de cacao par cette méthode car il présente un intérêt écologique et agronomique. Mots clés : coques de cacao, compostage, phytotoxicité, *phytophthora*

*Intervenant

Un observatoire à haute fréquence de la respiration des sols en milieu forestier tempéré en Bourgogne Franche Comté

Julianne Capelle ^{*1}, Clément Bonnefoy-Claudet ¹, Valentin Blanchet ¹,
Elodie Cognard ¹, Vincent Soudais ¹, Jean Lévêque ¹, Mathieu Thevenot ¹,
Julien Crétat ¹, Philippe Amiotte-Suchet ¹, Olivier Mathieu ¹

¹ Biogéosciences [UMR 6282] – Université de Bourgogne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

La respiration des sols est une composante majeure des flux de carbone au sein d'un écosystème. Sa variabilité temporelle haute fréquence (pas de temps quotidien à infra-quotidien) et spatiale à fine échelle (quelques mètres) demeure encore peu comprise en milieu forestier tempéré par manque de données. En particulier, de nombreuses incertitudes résident quant à la réponse de la respiration du sol à un événement météorologique intense (e.g., orage, sécheresse) et, plus encore, à une combinaison d'anomalies climatiques (e.g., séquence pluvieuse ou vague de chaleur dans un contexte sec). Par ailleurs, la réponse de la respiration au forçage climatique dépend des propriétés des sols et de la gestion forestière dont les effets demeurent peu connus. Cela limite la possibilité d'anticiper l'impact du changement climatique sur la respiration des sols.

Dans ce contexte, le laboratoire Biogéosciences a mis en place, depuis juillet 2020, un observatoire des flux de carbone avec une mesure horaire de la respiration des sols dans une hêtraie du Parc national de forêts (Châtillonnais, 21). Deux parcelles contiguës d'environ 15 ha chacune, avec une gestion sylvicole différente, sont instrumentées : l'une classée en futaie irrégulière (gestion conventionnelle) et l'autre en réserve biologique intégrale depuis plus de 30 ans. Sur chaque parcelle, la respiration du sol est mesurée par un système automatisé LI-COR 8100-A composé de quatre chambres pour une surface de 150 m². Les paramètres pédoclimatiques (température, humidité), mesurés sur la même période et au même pas de temps, ont été complétés par des mesures au laboratoire des propriétés physico-chimiques (carbone organique extractible à l'eau, stocks de carbone organique et Q₁₀) de 32 échantillons du sol par parcelle.

Les premiers résultats pour la parcelle en gestion conventionnelle révèlent un cycle diurne marqué de la respiration. Sur la période 2020-2023, elle est en moyenne plus forte la nuit que le jour, surtout en été. En juin par exemple, elle atteint 10,5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ la nuit contre 8,9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ le jour. Ce contraste jour/nuit, reproductible entre les chambres, reste à comprendre. L'intensité de la respiration varie quant à elle significativement entre les quatre chambres avec un écart-type de 5,1/4,6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ la nuit/le jour en juillet. Cette hétérogénéité spatiale fine échelle est en accord avec les propriétés physico-chimiques dont les résultats montrent généralement une différence intra-parcellaire supérieure à la différence entre les deux parcelles. Ces premiers résultats indiquent que comprendre la variabilité spatio-temporelle de la respiration des sols à fine échelle au sein de notre observatoire nécessite de prendre en compte à la fois le forçage climatique et les propriétés physico-chimiques des sols.

*Intervenant

Effet des pratiques viticoles sur les stocks de carbone organique des sols du vignoble bourguignon

Elodie Cognard ^{*1}, Mathieu Thevenot ¹, Olivier Mathieu ¹, Clément Bonnefoy-Claudet ¹, Anne-Lise Santoni ¹, Andréa Ackermann ², Marianne Grenesche ², Honorine Louche ², Chloé Recouvreur ², Florenso Charles ³, Julien Giraud ³, Paul Legain ³, Romi Massoud ³, Camille Buisnière ⁴, Benjamin Alban ⁵, Audrey Cellier ⁶, Thomas Gouroux ⁷, Mathieu Oudot ⁸, Jean Lévêque ¹

¹ Biogéosciences [UMR 6282] – Université de Bourgogne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² L'Institut Agro Dijon – Ministère de l'alimentation de l'agriculture et de la pêche, Université Bourgogne Franche-Comté – France

³ Master SEME – Université de Bourgogne – France

⁴ Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne – Bureau interprofessionnel des vins de Bourgogne – France

⁵ Vinipôle Sud Bourgogne – Vinipôle Sud Bourgogne – France

⁶ Chambre d'agriculture de l'Yonne – Chambre d'Agriculture de l'Yonne – France

⁷ Chambre d'agriculture de la Côte d'Or – Chambre d'Agriculture de la Côte d'Or – France

⁸ Chambre d'agriculture de la Saône-et-Loire – Chambre d'agriculture de la Saône-et-Loire – France

La filière viticole en Bourgogne s'est engagée dans une démarche de neutralité carbone à l'horizon 2035. Parmi les leviers identifiés pour y parvenir, le stockage du carbone dans les sols viticoles est mis en avant. Cependant, les connaissances sur les stocks réels dans ces sols ainsi que les effets des pratiques viticoles sur le stockage et la dynamique du carbone reste à consolider. Dans ce cadre, le projet Matière Organique, Changement Climatique et Atténuation (MOCCA) a été co-construit avec le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne. Par une approche mélangeant analyse des pratiques viti-viticoles et enquête socio-économique ce projet permettra d'établir un bilan carbone des exploitations. Un des axes suivis est de mesurer les stocks de carbone organique présents dans les sols viticoles de Bourgogne et d'évaluer l'effet des pratiques sur ces stocks. La diversité des terroirs viticoles bourguignons permet l'étude de ces paramètres dans des contextes géo-pédo-climatiques variés.

Les pratiques viticoles ont été structurées en 4 catégories, la classe 1 étant la moins favorable au stockage du carbone dans les sols (désherbage chimique, exportation des sarments...) et la classe 4 la plus favorable (restitution des sarments, apports organiques, enherbement...). Cette typologie a été effectuée afin d'être la plus représentative possible du vignoble bourguignon et de la diversité des itinéraires techniques appliqués. Le plan d'échantillonnage compte 4 parcelles par catégorie pour chacun des départements du vignoble bourguignon (Yonne, Saône et Loire et Côte d'Or), soit un total de 48 parcelles. La méthodologie d'échantillonnage s'appuie sur celle appliquée dans le cadre du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. Pour chaque parcelle, deux

*Intervenant

prélèvements composites (0-30 cm et 30-50 cm) ont été effectués en mixant rang et inter-rang sur une surface d'environ 100 m². La densité apparente a été estimée sur ces mêmes profondeurs dans le rang et dans l'inter-rang. La teneur en carbone organique ainsi que la teneur en éléments grossiers sont mesurées au laboratoire afin de calculer le stock de carbone organique.

La campagne de terrain a débuté à l'automne 2023 et à ce stade du projet seuls l'Yonne et la Saône et Loire ont été échantillonnées. Les parcelles de l'Yonne, du fait de la faible profondeur des sols, n'ont été prélevées que sur 0-30 cm. Les analyses sont en cours de réalisation. En parallèle, une enquête auprès des viticulteurs sera réalisée afin d'affiner les connaissances sur leurs pratiques et notamment les apports organiques. Les stocks de carbone organique calculés pour chaque catégorie pourront être comparés au sein d'un même département et entre départements. L'objectif premier est d'estimer l'impact des pratiques sur le stock global et d'estimer l'effet " terroirs " (nature du sol, climat local...). Dans un second temps, des mesures portant sur la qualité des matières organiques seront réalisées via notamment une estimation de leur dégradabilité par incubation et de leur sensibilité à la température par la mesure du paramètre Q10. De même, une caractérisation moléculaire par pyrolyse et thermochemiolyse complétera ces analyses. L'ensemble des données devrait permettre une analyse complète des relations entre terroir, pratiques viticoles et stockage du carbone dans les sols.

Applicabilité de composés organiques microbiens (acides gras 3-hydroxylés) comme marqueurs de température et de pH en milieu lacustre

Arnaud Huguet *¹, Judith Lemarié¹, Lucile Cosyn Wexsteen¹, Sergio Contreras², Christelle Anquetil¹, Charline Giguët-Covex³, Erwan Messenger³, Andréa Julien³, Pierre Sabatier³

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Universidad de la Santissima Concepcion – Chili

³ Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Aucune mesure environnementale directe antérieure au 19^{ème} siècle n'étant disponible, notre connaissance des modifications climatiques passées repose principalement sur l'utilisation de marqueurs de paramètres environnementaux, incluant les lipides. A ce jour, les marqueurs environnementaux existants ont majoritairement été développés en milieu marin. La composition et le mécanisme de formation des carottes de sédiment marines sont en effet moins complexes que dans les milieux continentaux, par essence très hétérogènes. Cependant, il est essentiel de développer également de nouveaux marqueurs applicables aux milieux continentaux afin d'y évaluer la variabilité climatique et améliorer notre compréhension des changements environnementaux passés. Les acides gras 3-hydroxylés (AGH), lipides membranaires majoritairement produits par les bactéries Gram-négatif, représentent à ce titre un marqueur de température et de pH prometteur dans les sols. Contrairement aux sols, l'influence des paramètres environnementaux sur la distribution des AGH dans les lacs et l'applicabilité de ces composés comme marqueurs (paléo)environnementaux dans ces écosystèmes n'ont pas encore été étudiés en détail, malgré la possibilité offerte par les archives sédimentaires lacustres de reconstruire les conditions environnementales passées à haute résolution et en continu. L'objectif de ce travail était de savoir si les AGH pourraient être utilisés comme marqueurs de température et de pH en milieu lacustre. Pour ce faire, ces molécules ont été analysées dans des échantillons de sédiments lacustres prélevés (i) dans les Alpes françaises ($n = 52$), à des altitudes comprises entre 0 et 2535 m et (ii) au Chili ($n = 20$), à des altitudes comprises entre 63 et 1740 m.

Nous avons démontré que la distribution des AGH dans les sédiments lacustres différait de manière significative par rapport aux sols de la même région, suggérant que ces molécules sont principalement produites *in situ* dans les lacs, dans la colonne d'eau et/ou les sédiments. Par ailleurs, seules des corrélations faibles ont pu être obtenues entre l'abondance relative des AGH et la température moyenne annuelle de l'air (MAAT)/le pH. La variabilité de la distribution des

*Intervenant

AGH entre les différents lacs pourrait être liée à l'influence d'autres paramètres environnementaux que la MAAT et le pH (e.g. degré d'oxygénation, conductivité) et/ou un changement de diversité microbienne. Pour pallier cela, des modèles non-linéaires (algorithmes d'apprentissage supervisé, régression multi-linéaire) ont été appliqués au jeu de données disponibles pour tenir compte de la complexité du milieu environnemental et de l'influence concomitante de plusieurs facteurs sur la distribution des AGH. L'utilisation d'un algorithme de type random forest a permis d'obtenir des corrélations fortes ($R^2 > 0.6$) et significatives entre la distribution des AGH et la MAAT/le pH. Cela démontre le potentiel des AGH comme marqueurs de température et de pH en milieu lacustre.

Quantification de la rhizodéposition et du priming effect pour des cultures intermédiaires via un marquage au $^{13}\text{CO}_2$.

Baptiste Hulin * ¹, Simon Chollet ², Florent Massol ², Samuel Abiven ^{2,3}

¹ Laboratoire de géologie de l'ENS – Université Paris sciences et lettres – France

² CEREEP-Ecotron Ile de France (UMS 3194) – Département de Biologie - ENS Paris, Centre National de la Recherche Scientifique : UMS3194, Centre National de la Recherche Scientifique – France

³ Laboratoire de géologie de l'ENS – Université Paris sciences et lettres – France

Lorsque l'on évalue le potentiel de stockage de carbone d'une plante cultivée, il est utile de 1) quantifier les apports restitués au sol tels que les racines, la rhizodéposition et parfois la biomasse aérienne, et 2) estimer les gains ou perte de carbone attribués au priming effect. Cela permet d'établir un bilan des apports et des sorties à la fin de la culture. Si la quantité de carbone apporté par les racines et les parties aériennes sont relativement simples à mesurer, il en va autrement de la quantité de rhizodéposition et du priming effect.

Afin d'établir un tel bilan, 12 espèces de plantes d'interculture provenant de 3 familles de plantes (brassicacées, légumineuses et graminées) ont été cultivées deux mois dans des mésocosmes (15 litres) dans des conditions contrôlées simulant un climat tempéré estival en temps réel en écotron. Un marquage atmosphérique en multi pulse au $^{13}\text{CO}_2$ 99 % a permis de tracer le carbone photosynthétisé et ainsi de quantifier, la biomasse aérienne et racinaire, la rhizodéposition ainsi que les variations de stock de carbone dues au priming effect.

Les résultats montrent que la rhizodéposition représente un apport de carbone significatif (environ un quart de la biomasse racinaire), corrélé positivement à la biomasse racinaire. Cette dernière est donc un des principaux traits à considérer pour augmenter les entrées. Parallèlement, la plupart des plantes ont entraîné une accélération de la minéralisation de la matière organique du sol (priming effect positif), entraînant une perte de carbone cumulée au cours de la croissance de la plante pouvant être du même ordre de grandeur que les apports de biomasse. Ce priming effect est très hétérogène et difficilement expliqué par les traits végétaux, mais semble quantitativement plus important pour les brassicacées. Nous proposons que cette variabilité est due à la fois à l'hétérogénéité spatiale inhérente à ces processus, mais aussi à la grande variabilité des processus pouvant intervenir dans la rhizosphère, processus pouvant mener de manière simultanée à une accélération et/ ou une décélération de la décomposition de la matière organique native des sols.

*Intervenant

Distribution du carbone organique dans le sédiment d'interface de l'étang de la Beulie (SNO Observil, Loiret, France)

Amélie Humbrecht *¹, Anaëlle Simonneau¹, Veronika Veselska², Claude Lemilbeau¹, Josef Kaslik², Lydie Le Forestier¹

¹ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans - UMR7327 – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre, Institut National des Sciences de l'Univers, Université d'Orléans, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Regional Centre of Advanced Technologies and Materials, Departments of Experimental Physics and Physical Chemistry, Faculty of Science, Palacky University in Olomouc, 771 46 Olomouc – République tchèque

L'analyse des grands cycles à l'échelle des hydrosystèmes précise que le carbone, notamment le carbone organique (CO), est véhiculé par les cours d'eau sous diverses formes de différentes tailles (dissoute (COD), colloïdale, particulaire (COT)). La matière organique (MO) est largement étudiée pour son habilité à adsorber à sa surface des contaminants, tels que des métaux ou des produits pharmaceutiques (PP), jouant dès lors un rôle clé dans le transfert de contaminants. La particularité du bassin versant de l'Egoutier (Semoy, Loiret, France) réside dans l'accumulation de sédiments dans l'étang de la Beulie, situé en aval de rejets d'eaux usées, identifiés comme source de contaminants métalliques et organiques (Ledieu et al. 2021). L'évolution diagénétique de la MO accumulée dans les zones de rétention telles qu'un étang repose notamment sur les conditions physico-chimiques du milieu (pH, température, potentiel d'oxydo-réduction). Selon ces conditions, la MO pourra adsorber ou désorber les contaminants, leur offrant ainsi diverses possibilités de devenir. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'étudier la répartition granulométrique de la MO sédimentaire dans le continuum eau/colloïdes/sédiment. L'hétérogénéité spatiale des teneurs en contaminants à l'échelle de l'étang a été mise en évidence par Humbrecht et al. (en préparation et résumé ResMO Thème 1). Sur la base des résultats obtenus pour la réponse spatiale de la distribution granulométrique, des concentrations en COT, PP, et métaux, 3 zones (Z1, Z2, Z3) ont été identifiées d'amont en aval, comme représentatives de conditions d'accumulation et de concentration différentes. Des prélèvements de sédiments et d'eau ont été réalisés dans les 3 zones en septembre 2023. La fraction sédimentaire a ensuite été tamisée avec de l'eau ultra-pure afin d'obtenir 5 classes granulométriques. La fraction inférieure à 63 μ m a été centrifugée à 10000g pendant 30 minutes, le surnageant a été collecté et est défini ci-après comme eau de tamisage. Afin de quantifier la distribution "granulométrique" du CO, le COT a été quantifié dans chacune des fractions sédimentaires par Pyrolyse Rock-Eval, et le COD dans les eaux de l'étang et de tamisage. Les teneurs en COT montrent une diminution d'amont en aval entre les 3 zones (de 14,4% pour Z1 en amont proche du delta, de 12,1% pour Z2, et 11,3% pour Z3 proche de l'exutoire). Les analyses de COD des eaux de l'étang et de tamisage sont en cours. En complément, les analyses DRX et FTIR, réalisées sur ces fractions granulométriques, montrent une homogénéité des phases minérales et des groupes fonctionnels de la MO entre les

*Intervenant

5 fractions et dans les 3 zones. La kaolinite et la magnétite sont les deux principales phases minérales réactives identifiées. Les groupes CH2 symétrique, CH3 asymétrique et carbohydrate sont dominants. Finalement, la composition stricto-sensu du sédiment, qualifiée d'homogène, ne permet pas d'expliquer l'hétérogénéité spatiale des teneurs en contaminants, ni leur spéciation. Il convient dès lors d'explorer d'autres facteurs explicatifs tels que la physico-chimie des eaux, qui pourrait jouer un rôle crucial dans la réactivité de la MO à l'échelle de l'étang et du sédiment. Pour cela, une approche expérimentale en batch est en cours.

Sonder les interactions microbes-minéraux-matières organiques dans les sols par spectromicroscopie infrarouge photothermique

Floriane Jamoteau * ¹, Mustafa Kansiz ², Marco Keiluweit ¹

¹ Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Lausanne, 1015, CH – Suisse

² Photothermal Spectroscopy Corporation, Santa Barbara, CA 93101, USA – États-Unis

Les interactions entre les microbes, les minéraux et les matières organiques sont des clefs de compréhension de la dynamique du carbone, des nutriments et des contaminants dans le sol et les sédiments. Cependant, sonder ces interactions à des échelles pertinentes et à différents temps reste un défi analytique en raison de leur nature complexe et du manque d'outils permettant des analyses non-destructives. Le récent développement de la microscopie optique photothermique infrarouge (O-PTIR) ouvre la voie à l'analyse non invasive de ces interactions : grâce à une résolution sub-micrométrique et à des mesures sans contact. Dans cette étude, nous démontrons la capacité de la microscopie O-PTIR à analyser des microstructures organo-minérales jusqu'à une résolution de 400 nm, permettant la caractérisation non-destructive des composants organiques et minéraux à différents pas de temps. Les résultats ont montré que, bien que toutes ces microstructures minérales-organiques puissent être analysées sans dommage mesurable, moyennant une puissance de lasers appropriés, les minéraux mal-cristallisés et les composés à fort poids moléculaire sont plus sensibles aux dommages que les minéraux cristallins et les composés à faible poids moléculaire, respectivement. Malgré ces différences de sensibilité aux dommages causés par les lasers, tous les matériaux ont été analysés sans dommages et ont donc pu être analysés de manière répétée dans le temps. Aussi, lors d'analyses de microstructures organo-minérales synthétiques, nos résultats ont montré la possibilité de localiser des composés organiques liés ou non-liés à des minéraux, à l'échelle sub-micrométrique. Nos résultats mettent en évidence le potentiel de la microscopie O-PTIR et fournissent des recommandations analytiques pour son application permettant d'analyser les interactions microbes-minéraux-matières organiques dans les sols et les sédiments.

*Intervenant

Répétabilité et reproductibilité des analyses de la composition chimique de la matière organique naturelle par thermochimie GC-MS : exercice d'inter-comparaison au sein du réseau GEOF

Marine Liotaud * ¹, Emilie Jardé ¹, Angèle Le Calvez ¹, Christelle Anquetil ², Katell Quenea ², Catherine Lorgeoux ³, Fabien Lachaud ³, Laurence Mansuy-Huault ⁴, Claude Lemilbeau ⁵, Nadia Bouzid ⁶, Emilie Caupos ⁶, Clément Bonnefoy-Claudet ⁷, Olivier Mathieu ⁷, Mathieu Thevenot ⁷, Laurent Jeanneau ¹

¹ Univ Rennes, CNRS, UMR 6118 Géosciences Rennes – Univ Rennes, CNRS, Géosciences Rennes - UMR 6118, F-35000 Rennes, France – France

² Sorbonne Université, CNRS, EPHE, PSL, UMR METIS – Sorbonne Université, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05 – France

³ Université de Lorraine, CNRS, UMR 7359 GéoRessources – Université de Lorraine, CNRS, GéoRessources, F- 54000 Nancy, France – France

⁴ Université de Lorraine, CNRS, UMR 7360 LIEC – Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux LIEC UMR7360 CNRS Université de Lorraine, Nancy – France

⁵ Université d'Orléans, CNRS, UMR ISTO – ISTO Orléans – France

⁶ Université Paris-Est Créteil, CNRS, LEESU – Leesu – France

⁷ Université de Bourgogne, CNRS, UMR 6282 Biogéosciences – Biogéosciences, UMR 6282, CNRS, Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, F-21000 Dijon, France – France

Le transfert et la réactivité de la matière organique naturelle sont au cœur de grands enjeux sociétaux tels que le maintien de la biodiversité, le cycle du carbone et la qualité des sols et des eaux. Ces dynamiques sont contrôlées notamment par la composition chimique de la MON. A travers le continuum sol-rivière-estuaire, la thermochimie couplée à la GC-MS est une méthode permettant l'analyse simultanée de plusieurs familles de biomolécules. Cette technique analytique est utilisée par différentes équipes du réseau d'instrument GEOF de l'IR RéGÉF. Cependant, à ce jour, aucune étude d'inter-comparaison n'existe sur cette méthode.

Cette étude a été menée dans le cadre de l'atelier Pyrolyse du réseau GEOF via un stage de M2. Les objectifs étaient d'évaluer (i) l'erreur analytique de la technique de THM-GC-MS; (ii) la répétabilité des résultats pour un échantillon de sol analysé dans un laboratoire et (iii) la reproductibilité des résultats d'un laboratoire à l'autre. Six échantillons de sol d'écosystèmes différents (forêt de chêne, forêt de pin, charbonnière, urbain, agricole et tourbe) ont été sélectionnés. Chaque échantillon a été analysé 5 fois dans 5 laboratoires (Géosciences à Rennes, GéoRessources à Nancy, Biogéosciences à Dijon, LEESU à Créteil et METIS à Paris). Chaque laboratoire a utilisé ses conditions afin de se mettre dans les conditions réelles de comparaison

*Intervenant

avec les données issues de la littérature. L'ensemble des résultats ont été traités par la même personne afin de ne prendre en compte que les différences issues des méthodes analytiques.

Cette étude a permis la création d'une base de données THM-GC-MS de 175 molécules issues de 6 familles. L'analyse des conditions analytiques de chaque laboratoire montre des similitudes (type de colonne, mode d'ionisation), mais aussi des différences (programme de t_0 , t_0 pyrolyseur, temps de contact entre échantillon et TMAH).

Les résultats significatifs de cette étude sont l'estimation de l'incertitude, de la répétabilité et de la reproductibilité des analyses. L'incertitude analytique moyenne est de $26 \pm 10\%$. Au sein d'un laboratoire, la répétabilité des analyses varie d'un sol à un autre et d'une molécule à une autre. La reproductibilité n'est pas toujours garantie d'un laboratoire à l'autre. Ainsi, pour les sucres, une diminution de la proportion moyenne des acides aldoniques et une augmentation de la proportion moyenne des furannes sont observées en fonction de la température de pyrolyse et des temps de contact entre le sol et le réactif, avec des conséquences sur le calcul du rapport déoxy C6/C5 utilisé pour déterminer l'origine microbienne ou végétale des sucres.

A notre connaissance, il s'agit du premier exercice d'inter-comparaison réalisé en THM-GC-MS. L'estimation de l'incertitude globale analytique a été calculée sur 175 mol de 150 chromatogrammes (6 sols *5 répliques*5 labos) et permet de préciser (i) si une variation observée sur une proportion de molécules ou un ratio moléculaire est significative et (ii) de faciliter la comparaison avec les données de la littérature. Des études complémentaires ultérieures sur la variation d'un paramètre analytique clé dans les cinq laboratoires permettront d'évaluer plus précisément son impact sur les résultats.

Caractérisation et modélisation du rôle de la matière organique et des amendements en Cu(II) et Zn(II) sur la sorption et le transfert réactif de l'antibiotique sulfaméthoxazole dans un sol limono-sableux

Jean Martins * ¹, Lorenzo Spadini ¹

¹ Institut des Géosciences de l'Environnement – Institut de Recherche pour le Développement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Grenoble Alpes, Institut Polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology – France

La plupart des antibiotiques (AB) sont des ligands à charge variable qui possèdent des groupes fonctionnels complexant les métaux. Ils se lient au sol de diverses manières, par exemple par complexation en fonction du pH, échange d'ions, interactions hydrophobes... Cette variabilité et la complexité du sol rendent difficile la prédiction de la rétention des AB dans les sols. La sorption du sulfaméthoxazole (SMX), un antibiotique sulfamide largement répandu dans les sols naturels et les eaux, a été étudiée dans un sol agricole limono-sableux (INRA Versailles, Feucherolles) en batch et en colonnes de sol à différents niveaux d'amendement en MO exogène (lisier et acides humiques, échelle du %). Pour les trois substrats, la densité des sites de sorption au SMX a été assimilée à la quantité de protons échangés entre pH 4 et 10. Dans les batches, les amendements organiques ajoutés au sol augmentent la sorption du SMX proportionnellement à l'augmentation de la densité de sites induite par les amendements organiques. Cela indique que l'effet de la sorption accrue du SMX est liée à l'augmentation du nombre des sites seuls due aux amendements, si on considère une force de sorption unique entre substrats, ce qui est confirmé par des expériences de sorption mono-substrat. Une pré-contamination au cuivre augmente encore la sorption du SMX, vraisemblablement via la formation de complexes ternaires Sol-Cu(II)-SMX. Il y a donc mise en évidence de deux processus de sorption : interactions hydrophobes avec la MO du sol, et sorption via pontage avec un cation métallique. Concernant les essais en colonnes, la sorption du SMX dans le sol de référence est plus faible que celle mesurée dans à l'équilibre en batches, comme attendu (préservation de la structure du e compaction du sol dans les colonnes). En revanche, de manière inattendue, la sorption du SMX en conditions d'écoulement en colonnes de sols est nettement diminuée en présence de lisier, contrairement aux essais batch. De la même manière, en conditions d'écoulement en colonnes, la pré-contamination au cuivre n'augmente pas la sorption du SMX. L'hypothèse la plus probable, est qu'en colonnes, l'amendement organique s'accumule en multi-couches autour des constituants du sol, limitant ainsi l'accès des solutés aux sites de sorption et au cuivre ainsi recouvert, alors qu'en batches, l'agitation et le temps de contact plus long limitent ces effets. La réactivité d'un sol amendé en MO fortement réactive augmente donc en proportion de la densité de sites d'interaction apportés par l'amendement, à condition que les sites apportés restent accessibles aux solutés.

*Intervenant

Une réduction des précipitations stimule l'augmentation de la teneur en carbone organique dans la rhizosphère de l'eucalyptus dans un ferralsol du Brésil, notamment en profondeur

Céline Pradier ¹, Christophe Jourdan ¹, Amandine Germon ¹, Jean-Paul Bouillet ¹, Jean-Paul Laclau ¹, Agnès Robin ¹, José Leonardo De Moraes Gonçalves ², Irae Amaral Guerrini ³, Philippe Hinsinger * ⁴

¹ UMR EcoSols Montpellier – Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement [CIRAD] – France

² LCF - ESALQ Piracicaba – Brésil

³ FCA - UNESP Botucatu – Brésil

⁴ UMR EcoSols Montpellier – INRAE – France

Un des effets attendus du changement climatique est une réduction de 30% des pluies dans certaines régions d'Amérique du Sud d'ici la fin du siècle. Les processus liés au fonctionnement des racines constituent un levier important pour envisager un stockage de C en profondeur dans les sols et atténuer le changement climatique. Les écosystèmes de plantation tropicales à base d'eucalyptus constituent des situations pertinentes pour appréhender ces questions, compte tenu de la productivité importante de ces systèmes, et de leur capacité à coloniser très rapidement le sol en profondeur. Dans ce contexte, il est crucial d'évaluer la capacité de ces écosystèmes à stocker le C en profondeur dans le sol, et de mesurer les conséquences que pourraient avoir la modification du régime des pluies.

L'objectif de ce travail est d'étudier la capacité d'une plantation d'eucalyptus âgée de 5 ans à modifier les teneurs en C dans la rhizosphère, jusqu'à 4 m de profondeur, grâce à son système racinaire profond, en comparant des conditions de précipitations réduites par rapport à un régime pluviométrique normal. Pour cela, nous avons utilisé une expérience de réduction de pluie dans laquelle des gouttières surélevées avaient été installées avant la plantation des arbres afin d'éliminer 37 % des précipitations effectives. Des fosses de 4 m de profondeur ont été creusées dans l'une des parcelles de réduction de pluies et dans le témoin correspondant du même bloc expérimental. Les racines, leur rhizosphère et le sol non rhizosphérique (" bulk soil ") ont été prélevés dans 10 couches de sol jusqu'à 4 m de profondeur pendant la saison sèche, avec 4 répétitions par fosse. La teneur en C et en N du sol a été mesurée au CHN dans la rhizosphère et le " bulk soil " le long de ces profils de sol.

Les teneurs en C et en N du " bulk soil " ont diminué fortement avec la profondeur, passant de 0,70% en surface (0-0,2 m) à 0,13% en profondeur (3,5-4 m) dans le cas du C. Dans la rhizosphère de l'eucalyptus, des teneurs systématiquement plus élevées de C et de N ont été observées quelle

*Intervenant

que soit la profondeur. Il est remarquable de noter que les teneurs en N, et plus encore pour C, ont été significativement supérieures dans la rhizosphère des eucalyptus soumis à la réduction de pluie, excepté dans l'horizon 0-0,2 m. Ainsi, les teneurs en C de la rhizosphère dans le traitement à pluviométrie réduite ont été en moyenne 27 % plus élevées que celles du " bulk soil ", alors qu'une différence de seulement 8 % en moyenne a été observée dans le traitement témoin. Le rapport C/N de la rhizosphère a été supérieur dans la parcelle à pluviométrie réduite.

Nos résultats suggèrent que le régime pluviométrique peut induire soit une modification du patron de rhizodéposition des racines d'eucalyptus, soit du microbiome de la rhizosphère, soit des deux, conduisant à une capacité de décomposition de la matière organique et à un stockage potentiel de C différenciés. Les valeurs du rapport C/N de la rhizosphère semblent soutenir l'hypothèse selon laquelle les rhizodépôts seraient plus récalcitrants dans des conditions de réduction des pluies. Notre étude démontre la capacité de ces arbres à croissance rapide à avoir un impact considérable sur le stockage du carbone dans le sol à de grandes profondeurs, et des interactions significatives avec le régime des précipitations.

Impact du chaulage sur les émissions de CO₂ par les sols : des effets contrastés observés à différentes échelles.

Camille Rousset ¹, Henri Bréfort ¹, Olivier Mathieu ², Florian Bizouard ¹,
Ivan Jovovic ², Anne-Lise Santoni ², Mustapha Arkoun ³, Catherine
Hénault * ¹

¹ Agroécologie [Dijon] – Université de Bourgogne, Université Bourgogne Franche-Comté [COMUE],
Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement, INSTITUT
AGRO DIJON, INRAE – France

² Biogéoscience – université bourgogne – France

³ Centre Mondial de l’Innovation Roullier – Groupe Roullier – France

En plus de son intérêt connu pour la production agricole, l’application de produits chaulant carbonatés sur les sols acides est considérée comme un levier pour atténuer les émissions de protoxyde d’azote (N₂O) liés à la dénitrification dans les sols. Néanmoins, l’intérêt du chaulage pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) des sols est conditionné par l’évolution du carbone des carbonates de calcium (CaCO₃) apportés, en l’occurrence leur dissolution sous forme de CO₂, ainsi que l’effet du CaCO₃ sur l’évolution du carbone organique du sol (COS). Des effets contrastés du chaulage sur les émissions de CO₂ d’origine inorganique et dérivé du COS sont rapportés dans la littérature. La compréhension actuelle de l’impact du chaulage sur les émissions de GES est limitée par le manque d’études de terrain, et nécessite d’être approfondie. *En utilisant In situ* la méthode des chambres statiques, nous avons suivi l’effet de l’apport de deux produits chaulant (SC = CaCO₃ synthétique et MC = CaCO₃ marin) sur les émissions de CO₂ par rapport à des parcelles témoin (sans apport de CaCO₃), pendant la période de culture d’un seigle d’hiver (octobre 2021 - juillet 2022). Le pH, la teneur en azote minéral, les émissions de N₂O, l’humidité du sol et la température ont été mesurés au cours de l’expérience, ainsi que la biomasse végétale et le stock de COS (quantité, qualité par analyse Rock-Eval®) le jour de la récolte. En parallèle, une étude a été réalisée sous température contrôlée (20°C) pendant 45 jours en utilisant du sol déstructuré prélevé sur les parcelles témoin en avril 2022. L’étude a impliqué 6 modalités, 1 témoin et 2 traitements chaulés (SC et MC), chacun à 2 niveaux d’humidité (capacité au champ – CC et 60% CC). Des échantillons de sol des différentes modalités ont été prélevés chaque semaine pour être incubés sous air synthétique (sans CO₂). Cette étude s’appuie sur les signatures isotopiques pour tracer le CO₂ dérivé des produits chaulant et celui dérivé du COS.

In situ, les parcelles MC et SC ont émis significativement moins de CO₂ que les parcelles témoin. Le taux de COS à la récolte n’a pas été affecté, mais sa qualité a été modifiée par les apports de produits chaulant. Le chaulage a également été associé à une réduction des pertes de carbone organique dissous dans le sol. Sur sol déstructuré, les apports MC et SC ont entraîné une augmentation significative des émissions de CO₂, principalement causée par une dissolution rapide

*Intervenant

(in situ suggèrent que les effets positifs du chaulage sur le rendement, ne sont pas ternis par l'augmentation des émissions de CO₂ du sol, soulignant le potentiel des pratiques de chaulage sur le service de régulation du climat. Néanmoins, l'effet contradictoire observé sur sol déstructuré attise le débat de l'effet des CaCO₃ sur le cycle du carbone des sols.

Les auteurs remercient le financement du projet NatAdGES par le programme "Investissement d'Avenir", le projet ISITE-BFC (contrat ANR-15-IDEX-0003), le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), la banque publique d'investissement (BPI France) et le CMI-Roullier.

Recommendations and good practices for Dissolved Organic Carbon (DOC) analyses at low concentrations: effects of vials, filters and membranes, acids, sample matrix, re-used septa

Delphine Tisserand ^{*} ¹, Damien Daval ¹, Laurent Truche ¹, Alejandro Fernandez-Martinez ¹, Géraldine Sarret ¹, Lorenzo Spadini ², Julien Némery ²

¹ Institut des Sciences de la Terre – Institut National des Sciences de l’Univers, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR219, Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Gustave Eiffel, Université Grenoble Alpes – France

² Institut des Géosciences de l’Environnement – Institut de Recherche pour le Développement, Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement, Université Grenoble Alpes, Institut polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology, Institut Polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology – France

Numerous protocols for dissolved organic carbon (DOC) measurements exist, but they have never been compared, and tested, when DOC concentration is low (≤ 1 mg L⁻¹). Even if an ISO protocol for the determination of DOC concentration exists since 2018, it is certified for DOC values equal or above 1 mg L⁻¹, while many publications report DOC values much lower. Procedure for cleaning vials as well as the choice of filter material, the caps and the septa to be used with vials are not listed in the ISO protocol. This study describes experiments of the effect of the sample container, the filtration material, and the nature of acid solution used for dilution on DOC concentration.

Brown (opaque or amber) glass vial pyrolyzed for at least 1 h at 450 °C or 500 °C, filled with ultra-pure (UP) water (resistivity 18.2 MΩ.cm), filtrated through 0.45 μm hydrophilic polytetrafluoroethylene (PTFE) membranes previously rinsed with 20 mL UP water, resulted in a low DOC concentration increase from the baseline, with a 2.6-factor and the lowest relative standard deviation (RSD) at 5% (N = 9). Compared to the background signal, the lowest DOC concentration was obtained when the acidification was performed with analytical (p.a) or Optima® grade hydrochloric acid (HCl) (5.0-factor, RSD = 5% (N = 5), 4.9-factor, RSD = 10% (N = 5)).

When vial closures were composed of screwed caps and re-used (*i.e* pierced) septa, DOC concentrations lower than 1 mg L⁻¹, from a natural river sample, remained relatively stable after a 29-days storage period at 4 °C (91-95% recovery compared to initial concentrations) and recoveries were still at 94-111% after 2 months. However, the blank DOC concentration increased

*Intervenant

already after 15 days to an exceeded initial concentration by 134-166%. When frozen, pierced septa increased DOC in the samples after one to two months of storage, which reached up to a 30-fold factor for a 1 mg L⁻¹ standard.

Finally, the presence of sulfides ($\sum\text{H}_2\text{S}$), sodium (Na^+) or calcium (Ca^{2+}) did not induce a significant change in DOC concentration ($\leq 10\%$). To conclude, this article provides practical guidelines for the measurement of DOC in environmental samples.

Utilisation d'un nouveau capteur de fluorescence pour la caractérisation *in situ*, en temps réel et à haute fréquence de la matière organique dissoute en dans les milieux aquatiques

Gilles Varrault * ¹, Angélique Goffin ¹, Antoine Raoult ¹, Nadège Musabimana ¹, Sabrina Guerin-Rechdaoui ², Vincent Rocher ²

¹ Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains – Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 – France

² SIAAP - Direction du Développement et de la Prospective – SIAAP – France

La matière organique dissoute (MOD) dans les systèmes aquatiques constitue un mélange très complexe et dynamique de composés organiques provenant de sources naturelles et d'apports anthropiques. L'origine de la MOD et les transformations subies influencent sa composition et ses propriétés, qui à leur tour influenceront sa réactivité dans les milieux aquatiques. Les études de caractérisation de la MOD sont généralement réalisées sur des échantillons ponctuels, ce qui constitue une limitation importante quand il s'agit de suivre des processus à haute variabilité temporelle. Le suivi à haute fréquence et *in situ* de la MOD pourrait permettre de mieux comprendre son influence sur le fonctionnement écologique et le cycle des nutriments dans les milieux aquatiques en prenant en compte les processus à haute variabilité temporelle.

La spectrométrie de fluorescence est une technique optique qui permet la caractérisation de la MOD. En effet, les molécules organiques peuvent contenir divers groupements fluorophores. L'analyse de ces différents fluorophores peut aider à évaluer la composition de la matière organique dissoute (MOD), son origine et les transformations subies. Selon la littérature, le nombre de fluorophores associés à la MOD en rivière est spécifique à chaque site et se situe le plus souvent entre 3 et 10 fluorophores, pas forcément identiques d'un site à l'autre. Afin de réaliser un suivi à haute fréquence de la MOD dans les milieux aquatiques, il est nécessaire de développer des capteurs permettant la mesure de nombreux fluorophores. À ce jour, à notre connaissance, les sondes de fluorescence disponibles dans le commerce ne permettent l'analyse que de 1 à 3 fluorophores.

Par conséquent, une sonde de fluorescence brevetée appelée Fluocopée® a été développée dans le cadre d'une collaboration entre le LEESU (Université Paris-Est Créteil) et la direction de l'Innovation du SIAAP. Elle permet des mesures en temps réel à haute fréquence (toutes les 10 minutes) et *in situ* de 29 fluorophores. Cet outil a été déployé dans un premier temps en station d'épuration (STEU Seine aval) en amont du traitement biologique où il permet d'estimer les DBO5 et DCO en temps réel et à haute fréquence. Un observatoire de la MOD en Seine est en cours de constitution et sera composé de 6 à 8 sondes déployées de l'amont à l'aval de

*Intervenant

l'agglomération parisienne. Il permettra de caractériser l'impact d'une grande agglomération sur les quantité et qualité de MOD dans les milieux aquatiques.

En outre le suivi au laboratoire en spectrofluorescence de la cinétique de dégradation de la MOD contenue dans une vingtaine d'échantillons de rivière et de rejets de STEU notamment a mis en évidence des traceurs permettant la prédiction de la MOD rapidement biodégradable (moins de 5 jours), lentement biodégradable (5 à 45 jours) et réfractaire (non biodégradée en 45 jours). L'utilisation de ces traceurs, combinée avec l'utilisation de la sonde Fluocopée, permet donc d'estimer ces fractions de MOD à haute fréquence en rivière.

Cette nouvelle sonde offre un grand potentiel d'application, notamment pour le suivi de la qualité et de la quantité de matière organique dans les stations d'épuration des eaux potables et usées (pour l'optimisation des traitements) et dans les eaux continentales et marines pour une meilleure compréhension des processus biogéochimiques.

Thème 4 : Matières organiques dans les sols



Hétérogénéité des matières organiques dissoutes produites par les végétaux et évolution au cours de la biodégradation

Alienor Allain *¹, Marie Alexis¹, Maxime Bridoux², Liudmila Shirokova^{3,4}, Payandi-Rolland Dahédrey³, Oleg Pokrovsky^{3,5}, Yannick Agnan⁶, Guillaume Humbert⁷, Maryse Rouelle¹

¹ Sorbonne Université – CNRS : UMR7619 METIS, EPHE – France

² CEA / DAM Ile-de-France – CEA – France

³ Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research – Russie

⁵ BIO-GEO-CLIM Laboratory, Tomsk State University – Russie

⁶ Université Catholique de Louvain = Catholic University of Louvain – Belgique

⁷ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

La composition de la matière organique dissoute (MOD) est le reflet de ses sources de production, et des processus qu'elle a subi. Dans les environnements terrestres, les végétaux sont les sources initiales de MOD. Cependant, les processus qui affectent la MOD (dégradation biologique et abiotique, transfert, sorption) après la production et menant à la formation de MOD généralement observées dans les milieux naturels sont encore peu compris, du fait de la haute réactivité de celle-ci. Ces travaux ont pour objectif (1) de caractériser finement la MOD produite par différentes espèces de végétaux et (2) de suivre l'évolution de leur composition au cours de la dégradation par les micro-organismes du sol, afin de (3) mieux définir les propriétés et donc le devenir des MOD dans l'environnement.

Pour cela, des échantillons de matières organiques extractibles à l'eau (WEOM) issues du lessivage des parties annuelles de 6 espèces végétales contrastées (2 espèces de lichens, 1 espèce de graminée, 2 espèces d'arbustes nain et 1 espèce d'arbuste) ont été caractérisées grâce à l'utilisation conjointe de techniques analytiques complémentaires (analyses élémentaires, résonance magnétique nucléaire du ¹³C, absorbance UV-Vis, fluorescence 3D, et HRMS Orbitrap). Basés sur les résultats de cette caractérisation, 4 espèces végétales ont été sélectionnées pour effectuer des expériences de biodégradation de WEOM. Ces WEOM ont été inoculées avec une souche bactérienne puis incubée pendant 7 jours en conditions contrôlées. Les propriétés chimiques (composition élémentaire, propriétés optiques, teneur en acides organique et composition moléculaire) de la WEOM ont été mesurées quotidiennement pendant toute la durée de l'incubation, et l'activité biologique a été quantifiée (biomasse totale, unité formant colonie).

*Intervenant

Les résultats obtenus indiquent que les propriétés des WEOM produites varient selon les espèces et les types fonctionnels de végétaux : les végétaux supérieurs produisent des quantités de MOD plus importantes que les lichens, mais également des MOD significativement plus aromatiques et au poids moléculaire plus élevé, avec une diversité moléculaire bien plus importante. Au cours de la biodégradation de la WEOM, les composés produits par les lichens et graminoïdes sont quasiment entièrement consommés par la biomasse microbienne après 7 jours, tandis que les composés produits par les arbustes nains et les éricacées sont plus résistants. De plus, ces résultats mettent en avant la conservation de propriétés spécifiques aux végétaux durant la dégradation de la MOD. Ainsi, il peut être fait l'hypothèse que dans les environnements naturels, la MOD produite par des couverts végétaux contrastés ont des propriétés distinctes, et ne peuvent donc être considérés comme homogènes à l'échelle des environnements terrestres.

Composition moléculaire de la MOD des écosystèmes arctiques et lien avec la composition du couvert végétal

Alienor Allain *¹, Marie Alexis¹, Maxime Bridoux², Xavier Raynaud³, Hugo Potier^{1,3}, Yannick Agnan⁴, Maryse Rouelle¹

¹ Sorbonne Université – CNRS : UMR7619 METIS, EPHE – France

² CEA/DAM Ile-de-France – CEA – France

³ Sorbonne Université – CNRS : UMR7618, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMR242, INRAE, Université de Paris, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC), Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC) – France

⁴ Université Catholique de Louvain – Belgique

La matière organique dissoute (MOD) est une réserve de matière organique petite mais très réactive. Ses fonctions environnementales (formation et stabilité des sols, source de nutriments pour les micro-organismes, complexants des éléments traces et contaminants...) sont liées à sa composition, qui dépend de son origine. Dans les sols, la végétation est le principal producteur de MOD, mais les mécanismes de régulation la transforment et la transportent. En outre, dans les écosystèmes de l'Arctique, particulièrement vulnérables au changement climatique, on s'attend à ce que la composition du couvert végétal et donc les sources de MOD changent. C'est donc un défi d'actualité que de corréliser la composition de la matière organique à ses origines. Ces dernières années, la spectrométrie de masse à transformée de Fourier (FTMS) est devenue un outil essentiel pour l'identification des composants de la MOD au niveau moléculaire. Cette étude a pour but d'élucider la composition moléculaire de la MOD et de la mettre en relation avec les sources végétales potentielles, à l'aide de la spectrométrie de masse à haute résolution (HRMS) Orbitrap.

La fraction extractible des matières organiques (WEOM) des principales espèces du couvert végétal, ainsi que des échantillons de MOD provenant d'écosystèmes arctiques contrastés (eau du sol, plans d'eau, rivières) prélevés sur le site d'Abisko (Suède) ont été caractérisées par HRMS Orbitrap. Les compositions moléculaires des échantillons de MOD et de WEOM ont ensuite été comparées. La proportion de composés ubiquistes a été quantifiée dans les échantillons de MOD afin d'estimer la part de composés spécifiques ou non aux écosystèmes. Enfin, la composition des MOD naturelles a été comparée à la couverture végétale mesurée dans la zone d'influence la plus proche afin d'évaluer l'impact de la végétation sur la composition de la MOD.

Les résultats ont mis en évidence des similitudes importantes entre MOD de différents écosystèmes, ainsi qu'une proportion très importante (51-75 %) de composés ubiquistes. Malgré ces similitudes, il a été possible de différencier les écosystèmes en fonction de leur composition en MOD. De plus, la comparaison avec les WEOM dérivés de la végétation nous a permis de conclure que la MOD naturelle était fortement influencée par (1) les WEOM de la végétation dégradée (plutôt que fraîche) et (2) les arbustes (plutôt que les lichens et les graminoides). Enfin,

*Intervenant

l'influence des espèces végétales sur la composition moléculaire des MOD semble être proportionnelle à l'abondance relative de celles-ci au sein de la couverture végétale. En conclusion, cette étude a mis en évidence qu'une des conséquences possibles du changement climatique et de la modification des écosystèmes végétaux, une modification significative de la composition de la MOD et de ses fonctions environnementales étaient attendues.

Les lessivats de litière modifient-ils le puits de méthane des sols forestiers ?

Vincent Arricastres * ¹, Dorine Desalme ¹, Caroline Plain ¹

¹ SILVA – AgroParisTech, Université de Lorraine, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

Le méthane est un gaz à effet de serre possédant un pouvoir de réchauffement 28 fois supérieur à celui du CO₂ sur 100 ans, contribuant à plus de 23% du réchauffement climatique global. Les sols ont la capacité de produire et d’oxyder du méthane grâce à l’activité de bactéries méthanotrophes et d’archées méthanogènes. Le flux net de méthane du sol correspond au bilan de l’oxydation par les méthanotrophes du méthane produit par les méthanogènes et de celui diffusant depuis l’atmosphère. Le flux net de méthane est négatif dans les sols forestiers bien aérés, qui sont donc des puits de méthane.

Dans les forêts, les litières ont une influence sur les flux de méthane à l’interface atmosphère/sol. Elles peuvent agir physiquement, en constituant une barrière à la diffusion des gaz, et chimiquement en libérant des composés dans les sols qui peuvent modifier l’activité des communautés méthanotrophes et méthanogènes. Ces composés peuvent également modifier les propriétés physico-chimiques des sols et par conséquent, modifier indirectement les flux de méthane. L’effet de la présence des litières sur les flux de méthane du sol a été testé *in situ* en comparant les flux avec et sans litière, mais les résultats sont contradictoires.

L’objectif de cette étude était de tester si les composés chimiques émis par le lessivage des litières d’arbres de forêts tempérées modifiaient les flux de méthane du sol. Pour ce faire, les composés solubles de feuilles ou d’aiguilles de litière aérienne de quatre essences différentes (chêne, hêtre, pin et épicéa) ont été extraits au laboratoire par lessivage, puis pulvérisés sur 200g de sol tamisé de trois sols forestiers différents (alocrisol, cambisol et luvisol). Les flux de méthane ont été suivis pendant 48h à l’aide d’un spectrophotomètre. La masse volumique, la densité apparente sèche, le pH, les teneurs en azote et carbone des sols ont été déterminés après le suivi des échanges gazeux. En parallèle, la composition chimique en sucres, phénols, acides aminés ainsi que les contenus en carbone et en azote totaux des lessivats de litières ont été déterminés.

Pour toutes les familles de composés, les lessivats de chêne présentaient les teneurs les plus élevées par rapport à ceux des autres essences et plus particulièrement que ceux du hêtre qui était l’essence dont les teneurs étaient les plus faibles.

En moyenne, la pulvérisation des lessivats de litières a amélioré la consommation de méthane par le sol de plus de 8%. Cette amélioration dépendait du type de sol, seuls ceux qui consommaient initialement du méthane, le luvisol et le cambisol, ont vu leur consommation améliorée par l’ajout de lessivats. Les lessivats issus du hêtre et du chêne étaient ceux qui avaient le plus amélioré la consommation de méthane (11.5% et 7.4% respectivement). Ces résultats soulignent l’effet positif des composés issus de litière de feuille des quatre essences sur les flux de méthane des sols forestiers. Néanmoins, les différences d’effets entre sols et essences pourraient en partie expliquer les résultats contradictoires observés *in situ*.

*Intervenant

Déstabilisation du carbone organique dans les sols de montagne face au réchauffement climatique

Nicolas Bonfanti * ^{1,2}, Jérôme Poulénard ², Jean-Christophe Clément ¹

¹ Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques – Université Savoie Mont Blanc, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

² Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Les stocks de carbone organique des sols (COS) sont connus pour être plus importants et plus vulnérables dans les milieux de montagne que dans ceux de moindres altitudes. Les faibles températures qui caractérisent ces écosystèmes tendent à limiter l’activité de décomposition et de minéralisation du COS, conduisant à une augmentation de son temps de résidence et à son accumulation. Dans le contexte du réchauffement climatique, à l’instar des sols de toundra, nous pouvons nous attendre à une diminution de cet effet de stabilisation environnementale par les faibles températures, entraînant une boucle de rétroaction positive du réchauffement climatique (augmentation de la température -> déstabilisation du COS -> production de CO₂ -> augmentation de l’effet de serre -> augmentation de la température). D’autre part, le réchauffement climatique peut s’accompagner d’une augmentation de la productivité primaire, entraînant une augmentation des apports de COS et ainsi une boucle de rétroaction négative. L’augmentation relative de ces deux processus (minéralisation/productivité) détermine le comportement des sols alpins soit comme source, soit comme puits de carbone. Afin de tester cette hypothèse et d’anticiper ses effets, l’expérimentation Alpages Volants a consisté à transplanter des sols de l’étage alpin (2500m) vers l’étage subalpin (1900m), simulant un réchauffement climatique global d’environ +3°C. Les dynamiques du COS de ces sols ont été étudiées par un couplage d’approches flux et stocks : mesure de la respiration et des échanges gazeux de carbone (NEE) et échantillonnage du sol 7 ans après transplantation. Le COS a été analysé et caractérisé (quantité et stabilité) par l’utilisation de différentes méthodes (RockEval, fractionnement, caractérisation chimique, temps moyen de résidence). Les premiers résultats de cette étude, encore en cours, montrent une diminution de la quantité de COS dans les sols réchauffés. Ce carbone perdu concerne principalement des formes labiles (thermiquement labile, WEOC, POxC) et conforte l’hypothèse du comportement ”source de carbone” des écosystèmes alpins face au réchauffement climatique.

*Intervenant

Quels sont les paramètres contrôlant la sensibilité à la température de la matière organique des sols forestiers ?

Clément Bonnefoy-Claudet ^{*1}, Joeri Kaal ², Mathieu Thevenot ¹, Jean Lévêque ¹, Marco Panettieri ³, Jeremy Puissant ⁴, Elodie Cognard ¹, Anne-Lise Santoni ¹, Olivier Mathieu ¹

¹ Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université de Bourgogne – Université de Bourgogne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Pyrolyscience – Espagne

³ Instituto de Ciencias Agrarias (ICA-CSIC) – Espagne

⁴ Laboratoire d'Ecologie Alpine, Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, 27 LECA, Grenoble, France – Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS – France

Les sols jouent un rôle clé dans la régulation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre notamment par leur action sur la dynamique du carbone organique (stockage vs dés-stockage). Les forêts occupent 31% de la surface continentale et stockent environ 40% du carbone organique continental, pour moitié dans les sols. Le changement climatique en cours pourrait modifier la minéralisation de ce stock. L'effet de la température ou de la qualité des matières organiques sur les flux de carbone du sol reste une question d'importance. Dans cette étude, nous proposons d'utiliser le paramètre Q10, pour estimer la sensibilité à la température de la matière organique des sols sous quatre essences forestières (hêtre, épicéa, douglas et sapin pectiné). Ces valeurs de Q10 sont comparées à la composition moléculaire de la matière organique des sols et aux paramètres physico-chimique.

Le site d'étude est le mont Beuvray (Parc naturel régional du Morvan, France), une zone de moyenne montagne d'environ 1 000 ha avec une géologie et une pédologie homogènes. Un échantillonnage a permis de collecter 12 échantillons de sol (0-20 cm) par essence forestière (48 au total), en intégrant la diversité topographique pour chaque essence. Les caractéristiques physico-chimiques des sols (pH, teneur en carbone organique et en azote total, carbone extractible à l'eau) ont été déterminées. Le paramètre Q10 a été calculé pour une plage de température de 5 à 25°C à l'aide d'un Respicond X (Nordgren Innovations AB, Suède). La caractérisation moléculaire a été effectuée par pyrolyse et thermochimie couplée à la chromatographie en phase gazeuse (Py-GC-MS et THM-GC-MS) et a permis de détecter environ 200 composés.

Les résultats indiquent que les teneurs en carbone organique du sol et en carbone organique extractible à l'eau sont plus élevées dans les sols sous sapin pectiné et hêtre que dans les sols sous douglas. Les mesures de Q10, statistiquement différentes, montrent une valeur plus élevée pour le hêtre que pour les résineux, ce qui suggère, pour cette expérience menée au laboratoire, que les émissions de CO₂ des sols sous hêtre augmenteraient plus rapidement avec la température par

*Intervenant

rapport aux autres essences. Le Q10 n'est pas corrélées avec les paramètres physico-chimiques du sol, mais il est corrélé avec certains indicateurs moléculaires comme l'indice de Shannon, représentant un indice de diversité moléculaire calculé pour chaque échantillon. L'analyse en partitionnement de variance indique que cette diversité moléculaire est l'un des éléments explicatifs du Q10, en comparaison des données physico-chimiques, mais la part de variance inexplicée reste importante (~75%).

En conclusion, nos résultats démontrent que la sensibilité de la matière organique à la température dépend en partie de sa composition moléculaire. Cependant, le compartiment microbien n'a pas encore été étudié et pourrait aussi expliquer une partie de la variance observée. Cette hypothèse sera partiellement explorée par des analyses de l'activité de plusieurs enzymes extracellulaires du sol. Ces résultats, obtenus au laboratoire, nécessiteront d'être confortés *in situ*, à partir d'observatoires de terrain de mesure de la respiration des sols.

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

Zohra Bounouara * ¹, Tiphaine Chevalier ², Didier Blavet ², Martial Bernoux ², Joele Toucet ², Mahtali Sbih ¹, Bensaid Rabah ¹

¹ University of Batna Hadj Lakhder [Algeria] – Algérie

² Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Institut de Recherche pour le Développement, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – France

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. 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).

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 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.

*Intervenant

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.

Stocks de carbone dans des sols sous agriculture familiale en Afrique Sub-Saharienne – les enseignements du projet SoCa

Lydie Chapuis-Lardy * ¹, Tiphaine Chevallier ¹

¹ Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes – Institut de Recherche pour le Développement, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – France

collectif du projet SoCa par (pays) & (institution partenaire) : (Bénin) (INRAB) Aholoukpè H.; (UAC) Amadji G.L., Houssoukpévi I.A., Koussihouède H.; (Cameroun) (IRAD) Njbe Mbile J.-G.; (ICRAF-World Agroforestry) Takoutsing B. ; (Univ. Dschang) Enock S., Fonkeng E.E., Mandah P.V., Tabi F.O.; (IITA) Masso C.; (Côte d'Ivoire) (UNA) Kone A., Silue B.; (CNRA) Kotaix A. J.-A.; (France) (IRD) Barthès B., Blanchart E., Cambou A., Masse D., Moulin P., Rakotondrazafy N., Trap J.; (Cirad) Harmand J.-M., Mathé S., Sauvadet M. ; (Madagascar) (LRI Univ. Antananarivo) Rakotovao N., Ramifehiarivo N., Rasoarinaivo A., Razafimbelo T.M. ; (Sénégal) (UCAD) Malou OP, Thiam A.; (ISRA & FAO) Ndour Badiane Y.

Une augmentation infime des quantités de carbone organique présent dans les 30 à 40 premiers centimètres des sols permettrait de contrebalancer les quantités de CO₂ rejetées annuellement dans l'atmosphère par les activités anthropiques (<https://www.4p1000.org/fr>), avec des co-bénéfices en termes de fertilité des sols et de productivité agricole. Toutefois, le stockage du carbone dans le sol dépend de nombreux facteurs dont le climat, le type de sol, son occupation et les pratiques agricoles. Autant de facteurs peu étudiés, notamment dans les systèmes agricoles familiaux des zones tropicales, alors même que les enjeux sont là plus importants qu'ailleurs.

Le projet *Beyond climate, Soil Carbon sequestration to sustain tropical family farming* " SoCa " s'est intéressé au Carbone des sols pour l'agriculture familiale en zone tropicale. Ce projet est né des collaborations tissées entre chercheurs africains, malgaches, et Français au sein du réseau CaSA *Carbone des Sols pour une Agriculture durable en Afrique*. Il répond aux enjeux de l'atténuation et de l'adaptation aux changements climatiques (ODD 13), de la sécurité alimentaire (ODD 2), mais aussi dans une moins mesure à la préservation de la biodiversité (ODD 15).

Conduit entre 2017 et 2023 dans 4 pays d'Afrique (Bénin, Cameroun, Côte d'Ivoire, Sénégal) et à Madagascar, SoCa a permis de soutenir les activités de recherche de 3 post-doctorants et 8 doctorants. Le projet a examiné des situations pédoclimatiques et culturelles variées, notamment des systèmes de cultures annuelles sous parc à *Faidherbia* en zone aride, des systèmes agroforestiers complexes sous climat tropical plus humide, et la riziculture pluviale d'altitude. Tous

*Intervenant

les systèmes de culture étudiés ont été choisis en situation de bas intrants, contexte particulier de l'Agriculture familiale dans les pays du Sud.

La collecte de données socio-économiques et biophysiques sur ces terrains d'étude a permis la quantification des stocks de Carbone sous différents systèmes et la compréhension des processus impliqués aux échelles locales, afin d'appuyer les agriculteurs dans leurs pratiques agroécologiques. Une sélection des principaux produits du projet (base de données ; cartes ; publications scientifiques ; bande dessinée ; video ;...) sera présentée, accompagnée des messages clés.

Origin of long-term soil organic carbon persistence revealed by nanoscale analyses

Mathieu Chassé * ¹, Corentin Le Guillou ², Jean-Christophe Viennet ³,
Sylvain Bernard ³, Pierre Barré ⁴

¹ Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – Sorbonne Université UPMC Paris VI, Muséum National d’Histoire Naturelle (MNHN), CNRS : UMR7590 – France

² Unité Matériaux et Transformations - UMR 8207 – Centrale Lille, Institut de Chimie - CNRS Chimie, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

³ Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie – Museum National d’Histoire Naturelle, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UR206, Sorbonne Université : UM120, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7590, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Laboratoire de géologie de l’ENS – Institut National des Sciences de l’Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris – France

Understanding the origin of long-term, *i.e.* pluri-decadal to centennial, soil organic carbon persistence is crucial to manage and forecast soil carbon stocks evolution, a key challenge to improve soil security and constrain soils influence on climate change. Persistence is expected to result either from (1) chemical recalcitrance (*i.e.* specific chemical structure reducing the rate of decomposition), (2) physical or physico-chemical protection (*i.e.* material or energetic barrier induced by organo-mineral interactions preventing decomposition). The nature and relative importance of these processes remain elusive due to the nanometric scale of the protection and the difficulty to separate persistent organic carbon from ordinary one.

We overcome these limitations by combining scanning transmission X-ray microscopy (STXM) and scanning transmission electron microscopy (STEM) to study soil samples from the oldest long-term bare fallow field experiment. In these field experiments, conducted on a silt-loam luvi-sol under temperate climate, carbon inputs to the soil were stopped eighty years ago. A fraction of the organic carbon was gradually decomposed resulting in an enrichment in persistent organic carbon. The comparison of the properties of organic carbon in soil after eighty years with organic carbon sampled at the onset of the experiment can help elucidating the mechanisms leading to its persistence. The spatial resolution of the analytical techniques gives access to textural and chemical properties at the nanometric scale at which protection mechanisms are expected to occur.

The analysis of STXM–near-edge X-ray absorption fine structure spectra gives access to carbon speciation at a 100 nm resolution. Carbon-rich particles above this size are scarce in the samples rich in persistent organic carbon, dominated by a diffuse carbon signal. This organic carbon exhibits a molecular composition similar to that of average soil organic carbon. Chemical recalcitrance is thus secondary in explaining persistence in contrast to physico-chemical inter-actions occurring below 100 nm. At such scales, STEM images coupled with energy dispersive spectroscopy indicate that this diffuse carbon is mixed with or adsorbed on phases which size is often below a few dozens of nanometers. Physico-chemical interactions with such nanophases must then explain soil organic carbon persistence.

*Intervenant

Effet des pratiques agricoles sur la stabilité structurale des sols et la déprotection des matières organiques lors de cycles de dessiccation – réhumectation

Clémentine Chirol *¹, Valérie Pot¹, Patricia Garnier¹, Claire Chenu¹,
Cédric Plessis¹, Valérie Pouteau¹, Dalila Hadjar¹, Marine Lacoste²,
Andrew King³

¹ Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

² InfoSols – Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

³ Synchrotron SOLEIL – Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UR1 – France

Ce travail explore le processus de déprotection physique des matières organiques dans les sols agricoles lors de cycles de dessiccation - réhumectation. L’augmentation des conditions de sécheresse due au changement climatique devrait entraîner des cycles de dessèchement et de réhumidification plus fréquents et plus intenses dans les sols. L’existence de pics d’émissions de CO₂ du sol vers l’atmosphère pendant la phase de réhumectation a été amplement documentée. Une hypothèse pour expliquer ces émissions est la déprotection physique de la matière organique résultant de la modification de la structure du réseau poral. La stabilité structurale pendant les cycles de dessiccation - réhumectation dépend des propriétés du sol (par exemple, la texture et la teneur en carbone), mais également des pratiques de gestion dans les agroécosystèmes (pratique ou non du labour).

Nous avons utilisé la tomographie RX au synchrotron pour mesurer la dynamique de la structure 3D du sol et de la distribution spatiale des matières organiques au cours de cycles de dessiccation - réhumectation. Les échantillons de sol ont été prélevés dans la couche de 2 à 5 cm de deux Luvisols, cultivés respectivement en agriculture conventionnelle et en agriculture de conservation. Les échantillons ont été séchés à température ambiante puis fragmentés manuellement en agrégats de 2-3 mm, et leur matière organique a été marquée à l’Osmium. 18 agrégats ont été soumis à 3 cycles de dessiccation - réhumectation et scannés à une résolution de 1,3 μm avant et après chaque réhumectation. La dynamique de la structure du sol lors de la phase de réhumectation a également été capturée à l’aide de scans rapides (1s) effectués à intervalles réguliers pendant 10 minutes à une résolution de 2,2 μm .

Nos résultats préliminaires tendent à indiquer une meilleure stabilité structurale des sols sous agriculture de conservation par rapport à ceux sous agriculture conventionnelle, coïncidant avec une plus grande concentration de matières organiques particulières marquées à l’Osmium. Les agrégats issus de l’agriculture de conservation gonflent moins, forment des fissures plus fines et présentent une meilleure récupération structurale après séchage, en particulier au cours du

*Intervenant

premier cycle. L'impact de cette différence de stabilité structurale sur la déprotection physique des matières organiques reste encore à explorer. La suite de ce projet permettra de quantifier les interactions entre la distribution des matières organiques et l'évolution du réseau poral au cours des cycles de dessiccation-réhumectation, afin d'explorer l'impact du mode de pratique agricole sur la décomposition des matières organiques en contexte d'aridité.

Étude de la complémentarité des fractions thermiques et physiques du carbone organique des sols

Amicie Delahaie *¹, Lauric Cécillon¹, Marija Stojanova¹, Samuel Abiven¹, Pierre Arbelet², Dominique Arrouays³, François Baudin⁴, Antonio Bispo³, Line Boulonne³, Claire Chenu⁵, Jussi Heinonsalo⁶, Claudy Jolivet³, Kristiina Karhu⁶, Manuel Martin³, Lorenza Pacini^{1,2}, Christopher Poeplau⁷, Céline Ratié³, Pierre Roudier⁸, Nicolas Saby³, Florence Savignac⁴, Pierre Barré¹

¹ Laboratoire de géologie de l'ENS – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris – France

² Genesis – Genesis – France

³ InfoSols – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

⁴ Institut des Sciences de la Terre de Paris – Institut National des Sciences de l'Univers : UMR7193, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

⁶ Department of Forest Sciences [Helsinki] – Finlande

⁷ Thünen Institute of Climate-Smart Agriculture – Allemagne

⁸ Manaaki Whenua – Landcare Research [Lincoln] – Nouvelle-Zélande

L'évaluation de la stabilité biogéochimique du carbone organique des sols (COS) est essentielle pour mieux prévoir l'impact du COS sur les mesures d'atténuation climatique et la santé des sols. Cette évaluation peut être réalisée à l'aide de méthodes de fractionnement du COS qui permettent de quantifier les fractions de COS ayant une stabilité biogéochimique différente. Cependant, la plupart de ces méthodes sont coûteuses et longues à réaliser, et ne peuvent pas être mises en œuvre sur de grands ensembles d'échantillons. Deux exceptions sont (1) le protocole de fractionnement physique POM/MAOM, technique largement utilisée qui permet de séparer le carbone organique particulaire (POC) et le carbone organique associé aux minéraux (MAOC), et (2) le protocole de fractionnement thermique PARTYSOC, technique émergente qui distingue le COS actif (Ca ; temps moyen de résidence d'environ 30 ans) du COS stable (Cs ; stable à l'échelle centennale). Dans ce travail, nous utilisons des analyses effectuées sur des échantillons du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) pour comparer les résultats des fractionnements thermiques (Ca/Cs) effectués sur environ 2000 échantillons, et des fractionnements physiques (POC/MAOC) effectués sur environ 1000 échantillons. Nos résultats montrent que les compartiments MAOC et Cs d'une part, et POC et Ca d'autre part sont de tailles différentes. Les fractions les plus stables du point de vue biogéochimique (Cs et MAOC) sont principalement influencées par les caractéristiques du sol, tandis que l'occupation du sol et le climat influencent davantage

*Intervenant

le POC et le Ca. Cependant, les fractions les plus stables fournies par les deux techniques de fractionnement (de même que les fractions les plus labiles) ne sont pas influencées exactement par les mêmes facteurs environnementaux. Nos résultats suggèrent donc que les deux techniques de fractionnement donnent des résultats complémentaires. La contribution relative de ces techniques de fractionnement à l'évaluation des fonctions des sols et de l'évolution des stocks de COS reste à évaluer sur le long terme sur des réseaux de surveillance des sols et constitue une perspective de recherche prometteuse.

Evaluation de l'activité microbienne et de la stabilité structurale des sols à l'échelle parcellaire

Julie Foulon ¹, Emmanuelle Baudu ¹, Thomas Puginier ², Robin Beghin-Tanneau ¹, Nathalie Jarosz-Pelle ², Vincent Bustillo ², Claire-Emmanuelle Marcato-Romain * ³

¹ Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaire et Environnementale – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut Universitaire de Technologie - Paul Sabatier – France

² Centre d'études spatiales de la biosphère – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

³ Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaire et Environnementale – Université Toulouse III - Paul Sabatier : EA4565 – Université de Toulouse, UPS, IUT "A", Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaires et Environnementale, EA 4565; F-32000 Auch, France, France

Les sols du sud-ouest de la France sont soumis à un aléa d'érosion fort. La sensibilité des sols à l'érosion dépend de nombreux paramètres physico mais également biologiques. C'est dans ce cadre que le projet EC2CO SEPSOL a été mis en place en collaboration entre le Laboratoire de Biotechnologies Agroalimentaire et Environnementale (LBAE), le Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), le laboratoire d'écologie fonctionnelle et environnement (LEFE) et l'INP Purpan, autour du site atelier d'Auradé (32).

La parcelle étudiée est en pente et comprend des zones cultivées en grande culture et des zones enherbées. Des approches multiscalaires (mesures à la parcelle et au laboratoire) physico-chimiques et biochimiques ont été combinées pour évaluer les relations entre qualité microbiologique et stabilité structurale des sols (méthode de Le Bissonais). La diversité fonctionnelle a été évaluée par Biolog, et la production de substances exopolymériques microbienne (EPS) a été évaluée par dosages colorimétriques et fluorimétriques.

Les résultats obtenus ont montré, au sein d'une même parcelle, une plus grande diversité, fonctionnalité, stabilité des sols enherbés que des sols cultivés, avec des comportements différents au sein de la parcelle cultivée. Le focus sur les EPS a de plus montré des corrélations importantes entre leurs concentrations et la stabilité structurale des agrégats.

*Intervenant

CarboNium : Dynamique du Carbone dans le continuum terrestre - aquatique

Laure Gandois * ¹, Julien Némery ²

¹ Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique (Toulouse) – France

² UMR 5001, IRD, CNRS, INRAE, Grenoble INP, IGE – Université Grenoble Alpes – France

Projet impliquant le collectif CarboNium

Le projet ciblé PC5 CarboNium " Dynamique du carbone dans le continuum terrestre – aquatique : Soutien aux infrastructures " du PEPR FairCarboN a pour ambition de contribuer à mieux documenter le cycle du carbone à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques (eaux de surface, zones humides), à l'interface entre les surfaces continentales et les océans (écosystèmes côtiers, estuaires), et le long de systèmes fluviaux assurant le continuum Terre- Mer. Mieux quantifier les flux et connaître la dynamique du carbone dans les écosystèmes aquatiques est indispensable pour l'établissement des bilans carbone exhaustifs et pour contraindre les émissions de GES (Gaz à effet de serre) des surfaces continentales. CarboNium a été développé pour le soutien aux infrastructures de recherche (IR), et l'articulation avec les programmes nationaux (Terra Forma). Le projet a pour but de répondre aux objectifs suivants : (1) Synthétiser les données de flux et stocks de carbone dans le continuum terrestre aquatique des sites observatoires des infrastructures françaises (2) Densifier les observations de flux (y compris par de l'instrumentation à haute fréquence) et stocks de carbone des sites observatoires des infrastructures françaises, (3) Unifier les protocoles utilisés par la communauté française pour l'étude du cycle du carbone dans le continuum terrestre aquatique, (4) Proposer une plateforme de structure informatique ouverte d'archivage des données et permettant la modélisation multi-modèle du cycle du carbone dans le continuum Terre-Mer.

CarboNium se décline en 8 actions (WP), dont 2 actions transverses de synthèse de données de flux et de stocks de carbone, 5 actions d'instrumentation et d'acquisition de nouvelles données de la dynamique du carbone, dans les différents milieux concernés (bassins versants, zones humides continentales et côtières, lacs et estuaires) et une action de modélisation, à l'échelle du continuum Terre-Mer.

CarboNium va permettre à la communauté du carbone aquatique d'acquérir de nouvelles connaissances sur la dynamique, les flux et les stocks de carbone des eaux de surface et souterraines, zones humides continentales et côtières et des estuaires. CarboNium constituera, pour la communauté scientifique française qui aborde les questions du cycle du carbone aquatique, un cadre collaboratif de développement instrumental, méthodologique et de modélisation. Cette structuration améliorera la visibilité de la communauté au niveau international, et permettra la participation à des réseaux internationaux de suivi du carbone aquatique. CarboNium mobilisera plus de 60 chercheur.se.s de 15 laboratoires, impliqués dans les infrastructures de recherche du CNRS et de l'INRAE (AnaEE, OZCAR, RZA, RéGEF, ILICO...).

*Intervenant

Flux de carbone dans les sols cultivés : Oublions-nous de prendre en compte des entrées de carbone dans les sols agricoles ?

Guillaume Humbert * ¹, Gonzague Alavoine ¹

¹ Fractionnement des AgroRessources et Environnement – Université de Reims Champagne-Ardenne,
Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

Le stockage de carbone dans les matières organiques des sols agricoles reçoit de plus en plus d’attention. La considération de son rôle joué dans l’atténuation des changements climatiques s’est ajoutée aux considérations historiques des matières organiques pour leurs rôles joués dans le maintien de la structure et de la fertilité des sols. Dans les sols cultivés, les entrées de carbone habituellement prises en compte sont le carbone présent dans les résidus végétaux et les amendements organiques. Les apports de carbone par les exsudats racinaires (ou rhizodéposition), bien que difficilement estimables, sont aussi considérés. Mais les apports de carbone par les pluviolixiviats ne sont pas du tout étudiés. Les pluviolixiviats sont les eaux de pluies qui arrivent au sol après traversé d’un couvert végétal ; soit directement, soit par ruissellement ou percolation sur ou à travers le couvert. Ces eaux s’enrichissent en éléments présents sur les surfaces végétales (feuilles, tiges) et pouvant provenir des dépositions atmosphériques, des organismes vivants sur ces surfaces, ou de sécrétions produites par ces organismes ou les végétaux.

Nous avons étudié ce flux de carbone en analysant les eaux de pluies échantillonnées avec des pluviomètres au-dessus et en-dessous d’un couvert de colza au stade de développement du fruit. Trois événements pluvieux de 5, 7 et 60 mm ont été prélevés entre le 19 et le 23 juin 2023. La surface de sol couverte par le couvert a été estimée à partir de l’analyse de photographies. Les formes organiques et minérales du carbone présentes en solution dans ces eaux ont été analysées et les flux générés ont été comparés aux quantités de carbone présentes dans la biomasse à la surface du sol (parties aériennes et feuilles sénescentes).

Au moment de l’étude, 80 % de la surface du sol était recouverte par le couvert de colza (tiges, feuilles, ramifications, siliques). Selon la pluie, entre 50 et 90 % de l’eau de pluie traversait le couvert et atteignait donc le sol. Les pluviolixiviats analysés étaient 5 à 30 fois plus concentrés en carbone organique dissous que l’eau de pluie prélevée au-dessus du colza. Sur la période étudiée et en fonction de l’évènement échantillonné, les pluviolixiviats ont apportés au sol sous la culture de colza entre 0,06 et 15 kg C ha⁻¹. Cela représente entre 1 % et plus du double de la quantité de carbone immobilisée dans les parties aériennes du couvert.

Ces flux de carbone semblent considérables et demandent à être précisés en explorant leur généralité par l’analyse de pluviolixiviats sous un colza à différents stades de développement, mais aussi sous d’autres cultures. Les effets du régime des pluies et plus généralement du climat sur la dynamique d’accumulation des matières transférables dans les pluviolixiviats devront également être évalués. Les origines, les formes et la réactivité du carbone contenu dans ces pluviolixiviats

*Intervenant

posent également questions. Quelle proportion de ce carbone a été effectivement produit par le couvert végétal ? Ce carbone est-il rapidement décomposé, assimilé ou minéralisé par les microorganismes du sol ou contribue-t-il directement à la fraction du carbone stabilisée dans les sols par interaction avec les phases minérales ?

Caractérisation thermo-chimique de la matière organique dans les sols agricoles soumis à différents types de fertilisation

Thomas Lerch *¹, Katell Quenea², Pierre Barré³, François Baudin⁴, Anke Herrmann⁵

¹ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

² Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols – Sorbonne Université – France

³ Laboratoire de Géologie de l'ENS – CNRS – France

⁴ Institut des Sciences de la Terre de Paris – Sorbonne Université – France

⁵ Swedish University of Agricultural Sciences – Suède

Toute pratique agricole qui augmente les apports de matière organique (MO) dans les sols a un effet positif sur les stocks de C, soit directement par les amendements organiques, soit indirectement par la stimulation de la biomasse végétale par la fertilisation chimique. Cependant, les mécanismes impliqués dans la stabilisation du C ne sont pas encore bien élucidés. Il est donc important de pouvoir évaluer l'influence de la fertilisation organique ou chimique sur la nature et les propriétés chimiques de la MO qui conditionnent leur dynamique dans les sols. Dans cette étude, des échantillons de sol ont été prélevés dans les champs expérimentaux d'Ultuna à Uppsala, en Suède. Les parcelles sont cultivées en céréales depuis 1956 et ont reçu différents types de fertilisation (minérale et/ou organique) : sol nu, non fertilisé, fertilisé avec du nitrate de calcium, amendé avec de la paille, de la paille + nitrate de calcium, de l'engrais vert, du fumier, de la tourbe et des boues. La fertilisation organique est appliquée tous les deux ans (automne) sous la forme de 8 tonnes de MO fraîche par hectare. La fertilisation minérale est appliquée tous les ans (printemps) avec 80 kg d'azote par hectare. Une série d'analyses a été réalisée pour déterminer l'abondance, la diversité génétique et catabolique des microorganismes (Lerch et al., 2013 ; Bland et al., 2015 ; Changey et al., 2020). De plus, des incubations en conditions contrôlées ont été réalisées pour obtenir la cinétique de minéralisation de la MO. Ces changements sont liés au pH du sol et à l'évolution de la qualité de la MO. L'analyse thermique Rock-Eval® a révélé que les traitements qui avaient le plus augmenté la teneur en C au cours des 50 dernières années (tourbe, boues ou fumier) étaient liés à la MO du sol avec l'indice d'hydrogène (HI) le plus élevé. Les analyses par spectrométrie infrarouge moyenne (MIRS) et par résonance magnétique nucléaire à l'état solide (¹³C-NMR) suggèrent également que la qualité chimique de la MO influence sa décomposition par les communautés microbiennes. La pyrolyse GC-MS a permis d'estimer la contribution relative des différentes familles de molécules en fonction des traitements. Nous avons observé que la stabilité biogéochimique de la MO du sol était liée à une proportion plus élevée de lipides et de composés aromatiques.

*Intervenant

Impact de résidus de légumineuses sur la minéralisation et stabilisation du carbone organique par les communautés microbiennes du sol

Anouk Lyver ^{*1,2}, Jean Bernard Cliquet ², Isabelle Gattin ¹, Murilo Veloso ¹

¹ Agro-écologie, Hydrogéochimie, Milieux et Ressources – UniLaSalle – France

² Ecophysiologie Végétale, Agronomie et Nutrition NCS – Université de Caen Normandie, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

Dans le contexte actuel d’urgence climatique, le rôle crucial des sols en tant que puits de carbone est désormais reconnu. En conséquence, l’établissement de systèmes agricoles durables favorisant l’accumulation des matières organiques du sol (MOS) est envisagé comme l’une des leviers principaux pour contrebalancer les émissions de gaz à effets de serre (GES) causées par les activités anthropiques. Ceci s’intègre dans une politique de transition agroécologique globale, comme le souligne le lancement de l’initiative 4 pour 1000 à l’occasion de la COP21 pour conjointement mitiger les changements climatiques et assurer la sécurité alimentaire (1). L’intégration de légumineuses au sein des rotations culturales s’aligne également sur les directives d’une production autosuffisante en protéines végétales, et favoriserait la stabilisation du COS par une mise à disposition de l’azote pour les communautés microbiennes et les cultures suivantes (2). Néanmoins de nombreux questionnements subsistent. Comment la qualité des résidus de culture (C/N) et la fraction minérale du sol impactent la stabilisation de la matière organique ? Affiner notre compréhension de ces mécanismes est désormais devenue indispensable si nous souhaitons promouvoir une gestion plus informée des sols et plus particulièrement des sols agricoles (3). Le point central du projet PACLeg est de mieux comprendre le rôle de la qualité des résidus de cultures avec un gradient de ratio C/N entre 12 et 60 (de légumineuses et de céréales) apportés en différentes quantités sur les mécanismes impliqués dans la séquestration du COS dans des sols normands de texture et de minéralogie différentes. Nous supposons que les résidus végétaux avec un C/N plus faible, favoriseraient la production de MOS stable par le biais d’une association organo-minérale (MAOM), et ce tout particulièrement dans les sols argileux. Pour cela nous étudions la minéralisation, la conversion en MOS puis sa répartition dans les différentes fractions de la MO, de résidus de trois espèces végétales marquées au ¹³C et ¹⁵N, se différenciant par leur rapport C/N. Les parties racinaires ont été incubées intactes dans le sol limoneux ayant servi à la culture des plantes. En parallèle, les parties aériennes ont été apportées à des taux croissants (1, 2 and 6 Mg de C / ha) dans trois sols agricoles normands présentant des contenus et minéralogies en argiles différents. Nous présentons ici les résultats obtenus après deux mois d’incubation sur 1) la stabilisation de la MO des résidus de parties aériennes et racinaires marqués et sa répartition dans les différentes fractions du sol (POM, fraction limoneuse et argileuse) et 2) la structure des communautés microbiennes nouvellement induites par l’ajout des résidus de culture.

*Intervenant

- (1) Baveye et al. 2020. " Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-Storing Carbon Versus Restoring Soil Functions ". *Frontiers in Environmental Science* 8 (septembre): 579904.
- (2) Groenigen et al. 2017. " Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma ". *Environmental Science & Technology* 51 (9): 4738-39.
- (3) Chenu et al. 2019. "Organic Stocks in Agricultural Soils: Knowledge Gaps and Potential Innovations ". *Soil and Tillage Research* 188 (mai): 41-52.

Comment les champignons transforment-ils la litière végétale ? Focus sur la matière organique extractible à l'eau

Thanh Thuy Nguyen Tu * ¹

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Les champignons jouent un rôle crucial dans les sols, notamment car ce sont les seuls à dégrader efficacement la lignine, constituant majeur de la litière. Cette capacité à transformer la matière organique (MO) des sols fait des champignons des acteurs importants du cycle biogéochimique du carbone. Ce poster présente les premiers résultats du projet 13ChaMOS qui vise à mieux comprendre les mécanismes de transformation des MO par les champignons. Ce projet est basé sur une expérience de dégradation de litières végétales par le champignon saprophyte *Trichoderma harzianum*. Caractéristique des sols de régions tempérées et plus largement ubiquitaire dans de nombreuses régions du globe, ce champignon dégrade les parois des tissus végétaux grâce à plusieurs enzymes dont l'activité peut être mesurée in vitro. Son développement, ainsi que les transformations chimiques de la matière organique apportée comme substrat, ont été suivis par une combinaison de méthodes spectroscopiques et spectrométriques. Un dispositif original de marquage différentiel des litières au ¹³C a été mis en place pour tenter de déterminer le compartiment végétal (ligno-cellulose, sucres, ...) à l'origine des produits de dégradation et de biosynthèse du champignon.

Les premières observations et caractérisations chimiques confirment que le champignon modèle s'est bien développé durant l'expérience et qu'il a induit des modifications de la MO extractible à l'eau, compartiment souvent considéré comme un des plus réactifs de la matière organique. En parallèle, le suivi de l'activité enzymatique phénol oxydase, impliquée dans la dégradation des composés phénoliques de type lignine, suggère une activité de dégradation associée au champignon dès les premières semaines de l'incubation. De plus, l'analyse isotopique de la MO extractible à l'eau confirme que le champignon a probablement commencé à dégrader des macromolécules. Des analyses chimiques (infrarouge et pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse) sont en cours pour préciser les transformations chimiques associées.

Grand merci à Marie Alexis, Joëlle Dupont et Sandrine Lacoste pour leur aide dans le déroulement du projet.

*Intervenant

Impact de la nature du couvert végétal et des caractéristiques des sols sur la stœchiométrie de ces deux compartiments dans différents habitats arctiques.

Hugo M.g. Potier * ¹, Xavier Raynaud ², Maryse Castrec-Rouelle ¹, Yannick Agnan ³, Alienor Allain ¹, Veronique Vaury ¹, Luc Abbadie ², Marie A. Alexis ¹

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l’Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Institut d’écologie et des sciences de l’environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

³ Earth and Life Institute [Louvain-La-Neuve] – Belgique

Les changements climatiques affectent particulièrement la zone Arctique, où d’importants effets sur l’hydrologie, les processus pédologiques et les communautés végétales sont observés. Tandis qu’à large échelle les espèces ligneuses remontent vers le nord, des interactions locales entre topographie, dégel du pergélisol et augmentation des précipitations peuvent favoriser la mise en place de zones humides dominées par des plantes herbacées. Ces variations influencent la composition chimique de la matière organique (MO) et de la litière mais aussi le processus de dégradation de la matière organique des sols (MOS), modifiant la stœchiométrie des compartiments et des flux de matière entre ces derniers.

L’objectif de cette étude est de caractériser l’effet de différences des caractéristiques des sols et de composition des communautés végétales sur les cycles biogéochimiques du carbone (C) et de l’azote (N), mais aussi du molybdène (Mo) et du vanadium (V). Ces deux éléments traces (ET) d’origine lithogénique sont impliqués dans le cycle de l’azote, en entrant dans la composition d’enzymes permettant à certains organismes de fixer le N₂ atmosphérique. L’azote étant considéré comme limitant pour la production primaire dans ces écosystèmes, une modification des cycles du Mo et du V pourrait avoir des répercussions sur la disponibilité du N et donc sur l’amplitude des changements de végétation de ces systèmes. Pour ce faire, nous avons évalué les stocks élémentaires de C, N, Mo et V dans la végétation et des sols de plusieurs habitats subarctiques au sein d’une tourbière et d’une toundra à Abisko, au Nord de la Suède. Nos hypothèses sont que 1) les variations de composition floristique de la végétation influencent les stocks totaux de C, N, Mo et V dans la végétation et 2) les sols plus humides et organiques présentent des stocks supérieurs aux sols plus minéraux pour C et N, et inversement pour Mo et V.

Contrairement à nos attentes, des communautés végétales présentant des proportions variables d’espèces ligneuses et herbacées présentent des stocks totaux de C et de N similaires dans leur

*Intervenant

biomasse aérienne, avec en moyenne $140,1 \pm 56,9$ gC.m⁻² et $3,7 \pm 1,5$ gN.m⁻² de végétation. Au contraire, les stocks totaux de Mo sont supérieurs dans les communautés dominées par les herbacées par rapport aux communautés où les ligneux dominent, avec respectivement $157,4 \pm 47,1$ µgMo.m⁻² à $41,5 \pm 26,5$ µgMo.m⁻². Les stocks de V sont en revanche indépendants de la composition végétale mais sont plus élevés dans la tourbière ($113,8 \pm 142,6$ µgV.m⁻²) que dans la toundra ($12,0 \pm 7,6$ µgV.m⁻²). Dans les sols, les stocks de C et N sont bien contrôlés (en priorité) par la nature organique des profils et donc sont plus importants dans la tourbière, au contraire du V dont les stocks sont plus forts dans les profils où l'influence minérale est plus importante. Le Mo présente des stocks importants à la fois dans les profils de sols les plus minéraux et dans les plus organiques, témoignant d'une influence lithogénique et biologique sur son cycle. Cette étude confirme l'intérêt d'étudier conjointement la nature des communautés végétales, des caractéristiques des sols et de leurs interactions, afin de comprendre l'importance de la stœchiométrie sur l'évolution des écosystèmes et des cycles biogéochimiques en Arctique.

Note : Ce résumé n'a pas fait l'objet d'une communication au séminaire ResMO 2024

Effets de méthodes de préparation mécanisée du site en contexte de plantation forestière sur les stocks de carbone organique du sol et sur le priming effect.

Lucas Poullard * ^{1,2}, Emila Akroume ², Fabrice Bureau ¹, Michaël Aubert ¹

¹ Etude et Compréhension de la biodiversité – Université de Rouen Normandie – France

² Recherche, développement et innovation – Office National des Forêts – France

Lors de la phase de renouvellement des peuplements forestiers, la Préparation Mécanisée du Site (PMS) peut être utilisée pour favoriser la réussite des plantations forestières (Collet et al., 2014). Toutefois, la PMS entraîne une perturbation du sol et impacte de façon variable les stocks de carbone organique du sol (COS ; Mayer et al., 2020). Des méthodes de PMS alternatives sont aujourd’hui proposées pour réduire l’impact sur les propriétés des sols et ainsi préserver la fonction de séquestration du carbone des sols forestiers (Pellerin et al., 2020). Le projet de thèse vise à (i) tester les effets de différentes méthodes de PMS travaillant sur des surfaces variables sur les stocks de COS, (ii) identifier la réponse à court terme du stock de COS à la PMS sur un gradient textural de sol, (iii) mesurer comment une redistribution du COS au sein du profil après PMS influence le processus de minéralisation. À court terme, nous supposons (i) qu’un travail de PMS localisé à une surface réduite n’impacte pas de manière significative les stocks de COS contrairement à un travail en plein à l’échelle de la parcelle forestière, (ii) que le déstockage de COS dans les zones travaillées est proportionnel à la teneur en argile des sols et (iii) que la redistribution du COS après PMS provoque une surminéralisation par le processus de *priming effect*. Trois approches complémentaires sont utilisées : (i) une expérimentation *in situ* en blocs installée pour permettre un suivi long terme et testant cinq modalités de PMS d’intensité graduelle en terme de surface travaillée (état initial avant PMS puis suivi sur 2 ans pendant la thèse), (ii) un échantillonnage avant et après PMS sur un panel de douze sites en cours de renouvellement constituant un gradient textural de teneur en argile pour gagner en généralité par rapport à l’expérimentation *in situ*, (iii) une expérience en conditions contrôlées au laboratoire sur des carottes de sols provenant des modalités de l’expérimentation *in situ* sur lesquels sera mise à pousser une plante en C4 afin de suivre le processus de minéralisation grâce à la signature isotopique naturelle (¹³C) des plantes en C4. À l’issue de ces approches nous nous attendons à ce que nos résultats montrent une significativité des effets sur les stocks de COS proportionnelle à l’intensité de PMS, une diminution plus significative des stocks superficiels de COS (litière + horizon minéral de surface) dans les sites à forte teneur en argile, et un *priming effect* proportionnel à l’intensité de PMS.

*Intervenant

Caractérisation de la matière organique dissoute dans les glaces de tourbières à pergélisol

Lucía Pérez Serrano * ^{1,2}, Sergey Loiko ³, Artem Lim ³, Oleg Pokrovsky ¹,
Jean-Luc Rols ²

¹ Géosciences Environnement Toulouse – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement – Institut Ecologie et Environnement - CNRS Ecologie et Environnement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Institut National Polytechnique (Toulouse) – France

³ BIO-GEO-CLIM Laboratory, Tomsk State University, Tomsk – Russie

Les tourbières à pergélisol forment des réservoirs de matière organique dissoute (MOD). Dans l'hémisphère nord, les tourbières situées dans la plaine de la Sibérie occidentale représentent la majorité des eaux et de glace contenues dans le sol (Smith *et al.*, 2012). La moitié de ces ressources en glace se trouvent à l'échelle du pore dans les 3 premiers mètres du sol (Pollard and French, 1980). Cette glace dispersée contient un enrichissement en MOD par rapport aux eaux interstitielles de la couche active (Lim *et al.*, 2021). Dans un contexte de changement climatique, le dégel du pergélisol entraîne une profondeur accrue de la couche active, qui permet la libération de la MOD antérieurement piégée. Afin de caractériser la réactivité de la MOD, un site représentatif des tourbières à pergélisol a été choisi : Tazovsky, situé dans une zone de pergélisol continu en Sibérie. Quatre carottages (0-180 cm) ont été effectués le long d'une tourbière en suivant un gradient minérotrophe à ombrotrophe.

La nature de la MOD a été caractérisée pour les eaux interstitielles et pour la glace dispersée, en réalisant des analyses de concentration en carbone organique dissous ainsi que des cations, des anions, des acides organiques et des sucres. De plus, la spectroscopie UV-visible (250-800 nm) a été utilisée pour étudier les propriétés optiques, comme le degré d'humification (E2:E4), l'aromaticité (SUVA₂₅₄) et l'absorptivité molaire (MA), parmi d'autres. Les résultats préliminaires montrent une dominance de la MOD de faible poids moléculaire (Kuzmina *et al.*, 2023), qui devient aliphatique en profondeur. Cette fraction labile peut devenir bioaccessible pour le métabolisme microbien, ayant ultérieurement un impact sur la production de CO₂ et CH₄, et donc représenter un facteur important de réponse de l'écosystème au dégel du pergélisol, induisant des rétroactions importantes au réchauffement climatique en cours.

Références :

Lim, A. G., Loiko, S. V., Kuzmina, D. M., Krickov, I. V., Shirokova, L. S., Kulizhsky, S. P., Vorobyev, S. N., & Pokrovsky, O. S. (2021). Dispersed ground ice of permafrost peatlands: Potential unaccounted carbon, nutrient and metal sources. *Chemosphere*, **266**, 128953.

*Intervenant

Kuzmina, D., Lim, A.G., Loiko, S.V, Shirokova, L.S., Julien, F., Rols, J.L., & Pokrovsky, O.S. (2023) Dispersed ice of permafrost peatlands represents an important source of labile carboxylic acids, nutrients and metals. *Geoderma*, **429**, 116256.

Pollard, W. H., & French, H. M. (1980). A first approximation of the volume of ground ice, Richards Island, Pleistocene Mackenzie delta, Northwest Territories, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, **17**(4), 509-516.

Smith, L. C., Beilman, David. W., Kremenetski, K. V., Sheng, Y., MacDonald, G. M., Lammers, R. B., Shiklomanov, A. I., & Lapshina, E. D. (2012). Influence of permafrost on water storage in West Siberian peatlands revealed from a new database of soil properties. *Permafrost and Periglacial Processes*, **23**(1), 69-79.

Réhabilitation de sols de carrière calcaire en milieu semi-aride : impact des plantes sur l'agrégation de Technosols

Françoise Watteau * ¹, R Soria ², Raul Ortega ², Isabel Miralles ²

¹ Laboratoire Sols et Environnement – Université de Lorraine, Institut national de la recherche agronomique (INRA) : UMRINRAE1120 – France

² CIAIMBITAL, Almeria, , Department of Agronomy Center for Intensive Mediterranean Agrosystem and Agri-Food Biotechnology – Espagne

La dégradation de l'environnement causée par l'exploitation des carrières impose de restaurer les sols pour aider les écosystèmes dégradés à retrouver leurs conditions d'origine en termes de productivité végétale et de biodiversité. La création de Technosols avec des amendements provenant de déchets s'est avérée être une option viable pour la restauration des sols affectés par les activités minières dans les zones arides et semi-arides (Soria et al., 2021), où ces sols évoluent vers des sols naturels en suivant les processus édaphologiques typiques de l'environnement climatique. Dans ce cadre, il est donc important de suivre sur le long terme l'évolution de la qualité physico-chimique et biologique de ces Technosols. A ce titre, la structure du sol considérée comme un indicateur de cette qualité est étudiée 5 ans après l'application de traitements de restauration au sein d'une carrière représentative de la cimenterie de Gádor, dans la province d'Almería (Espagne, 36°55'20"N ; 2°30'29"W) (Miralles et al., 2021). Dans cette carrière, 18 parcelles expérimentales (Technosols) de 50 m² (10 m × 5 m) ont été installées en 2018, visant à appliquer sur le substrat limoneux de la carrière des amendements organiques obtenus à partir de résidus, à savoir : i) du compost provenant de restes de serres ; ii) du compost provenant de restes de taille de jardins ; iii) des boues urbaines stabilisées; iv) des mélanges de compost végétal et de boues. Des parcelles expérimentales sans amendements organiques (" parcelles témoins ") sont également mises en place. Chaque traitement est répliqué 3 fois et 50 plants de *Stipa tenacissima* L. et *Olea europaea* L. var. *sylvestris* Brot. ont été plantés dans chaque parcelle (projets BIOQUALIRES-PID2021-1275910B-100/AEI/10.13039/501100011033/FEDER ; CLIMARESTOR-TED2021-132687B-I00/AEI/10.13039/501100011033/European Union Next Generation EU/PRTR).

Les résultats soulignent une augmentation de la biomasse racinaire des plantes dans les sols amendés comparativement au contrôle, favorisant ainsi une macrostructure au sein de la rhizosphère, via une rétention plus forte des minéraux due à l'enchevêtrement des racines, l'adhésion sur les poils adsorbants et la présence de champignons. L'observation en microscopie électronique à transmission des microstructures (< 20 μm ; Watteau and Villemin, 2018) à l'interface racines / sol met en évidence la contribution de la microflore rhizosphérique à la micro-agrégation, d'une part via la biodégradation des tissus racinaires favorisant ainsi l'adhésion des minéraux et d'autre part par l'adsorption de minéraux sur les exopolymères bactériens. Ces derniers sont particulièrement présents dans le traitement " boues ", pour lequel sont également observés des agrégats constitués de floccs bactériens résiduels et de minéraux. L'apport de boues et de

*Intervenant

son cortège microbien semblent donc bénéfiques à une stimulation à la fois des biomasses et de l'agrégation rhizosphérique, même si la teneur en carbone des parcelles de ce traitement sont plus faibles comparativement aux autres traitements. Cette hypothèse sera confrontée aux valeurs de stabilité structurale des sols issus des différents traitements, ainsi qu'à la caractérisation des microstructures de leurs sols rhizosphériques, en vue de la préconisation des amendements les plus pertinents dans le cadre de cette réhabilitation.

Miralles I, Ortega R, Comeau AM. 2021. *mSystems*. Volume 6 Issue 6 e00752-21.

Soria R., Ortega R., Bastida F., Miralles, 2021. *Applied soil ecology*, 164, 103925.

Watteau F., Villemin G., 2018.. *Frontiers in Environmental Science*, Volume 6, 106.

Thème 5 : La biodiversité au cœur de la dynamique des MO



Influence des formations végétales, du microclimat et des caractéristiques du sol sur la distribution à l'échelle fine des champignons ectomycorrhiziens

Hyppolite Aignon * ¹

¹ Unité de recherche en Mycologie Tropicale et Interaction Plantes-champignons du sol – Bénin

La présente étude a porté sur l'influence des formations végétales, du microclimat et des caractéristiques du sol sur la distribution à l'échelle fine des champignons ectomycorrhiziens. Cette étude vise à évaluer l'effet des paramètres écologiques, pédologiques et climatiques sur les communautés fongiques. Elle a été réalisée dans la forêt classée de l'Ouémé Supérieur située au Nord Bénin dans trois différentes formations végétales (V1 = forêt claire à *Isobertia doka*, V2 = forêt claire à *Isobertia tomentosa* et V3 = forêt claire à *Uapaca togoensis*) repartis au sein de trois sites différents dont notamment Angaradebou, Sonnoumon et Gando, à raison d'un type de formation végétale par site. Neuf placeaux permanents de 2 500 m² ont été installés dans les trois formations végétales et subdivisés en 25 placettes de 100 m² chacun, soit au total 225 placettes. Les relevés mycologiques ont été effectués suivant une fréquence de deux visites par semaine et par placeau pendant 5 mois (Juin à octobre). L'abondance des espèces a été estimée par le comptage des individus intacts matures et immatures. Cinq échantillons de sol au total ont été prélevés dans tous les placeaux au niveau des placettes 1, 5, 13, 21 et 25 et analysés au laboratoire afin de déterminer les caractéristiques chimiques et physiques du sol. Les variables climatiques (température, humidité relative et pluviométrie) ont été mesurées à l'aide des data logger HOBO micro-station installés au milieu de chaque placeau (placette 13) et des pluviomètres au niveau de chaque site. L'Analyse Canonique des Correspondances (CCA) a été réalisée suivie des analyses de variances afin de déterminer l'influence des types de forêt, des paramètres physiques et chimiques du sol et du microclimat sur les communautés fongiques et l'Analyse de Redondance Canonique (RDA) a permis de montrer le type de relation qui existe entre les variables édaphiques significatives et la richesse spécifique en champignons. L'abondance totale en carpophores ($p=0,1038$) ni la richesse spécifique ($p=0,3985$) des communautés fongiques ectomycorrhiziennes ne varient suivant les types de forêt. Le carbone organique ($p=0,0004$) et l'azote total ($0,0103$) sont les deux variables significatives qui influencent les communautés fongiques et surtout négativement leurs richesses spécifiques. Aussi, les résultats ont montré que les paramètres édaphiques ($P=0,6724$) et climatiques ($P=0,4166$) ne varient pas suivant les types de forêt, ce qui nous a permis de conclure que les variations au sein des communautés fongiques dues aux variables édaphiques significatives sont bien réelles et sont exemptes de l'influence du type de forêt.

*Intervenant

Effets du régime hydrique des sols sur les communautés végétales et la composition des matières organiques dans deux écosystèmes Arctiques

Marie A. Alexis ^{*1}, Hugo Potier ^{*2}, Alienor Allain ^{*3}, Maryse Rouelle ^{*3},
Fabrice Vinatier ⁴, Julien Fouché ^{*4}

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols (METIS) – Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7619 – UPMC, Case courrier 105, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

² Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Sorbonne Université – France

³ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Laboratoire d'étude des Interactions Sol - Agrosystème - Hydrosystème – Institut de Recherche pour le Développement, AgroParisTech, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – France

Les écosystèmes des hautes latitudes se réchauffent plus vite que la moyenne mondiale et les sols à pergélisol stockent ~1500 Gt de carbone (C) organique. Le changement climatique modifie rapidement l'hydrologie des bassins versants nordiques et les communautés végétales. Le régime hydrique des sols contrôle le changement de végétation Arctique avec des communautés ligneuses se développant préférentiellement sur les plateaux " secs ", et les graminoides dans zones humides. Une évolution des communautés végétales induira un changement de la quantité et de la qualité biochimique des litières apportées au sol. D'autre part, le régime hydrique des sols impacte la vitesse de décomposition de la matière organique des sols (MOS). Ainsi, les changements de régime hydrique des sols et des communautés végétales vont altérer les dynamiques du C et N qui vont par la suite réguler le pouvoir de puits ou source de C des écosystèmes Arctiques vers l'atmosphère.

La présente étude vise à comprendre comment le régime hydrique du sol contrôle les communautés végétales et les propriétés de la litière, et comment ces dernières contrôlent quantité et composition des MOS. Les objectifs sont de 1/ déterminer les espèces végétales dominantes et caractériser la composition chimique de la litière en fonction d'un gradient d'humidité des sols et 2/ analyser les stocks, la composition et l'âge des MOS.

*Intervenant

Nos hypothèses étaient qu'en comparaison des écosystèmes plus secs, les écosystèmes plus humides présentent 1/ une litière et des MOS avec des C/N plus bas du fait des communautés végétales et d'une meilleure disponibilité en N, 2/ de plus grands stocks de C en surface et en profondeur et des MOS plus âgées du fait d'une minéralisation limitée.

Au Zackenberg, les stocks de C sont plus importants et le C/N plus bas dans les sols plus humides. Les MOS sont datées de ~ 500 à ~ 1600 ans à 0-30 cm et ~ 2250 à ~ 6200 ans à 30-60 cm avec des MOS plus récentes dans les sols humides. L'enrichissement en N des sols humides pourrait provenir de la qualité des litières et du dégel du pergélisol riche en N. A l'inverse, dans le cas d'Abisko, le C/N des MOS augmente avec le gradient d'humidité, le rapport Alkyl C/ O-Alkyl C diminue, l'âge des MOS est moderne en surface et 180-560 ans en profondeur sans lien avec l'humidité. Cela pourrait refléter le ralentissement de la décomposition des MOS dans les écosystèmes humides.

Les deux sites montrent des relations état hydriques – végétation – MOS différentes mais les différences de composition biochimique des litières issues de différentes communautés végétales, contrôlées par le régime hydrique, conditionneraient la disponibilité en N et la composition des MOS. Ces résultats montrent l'intérêt d'étudier l'hydrologie et la végétation pour anticiper l'évolution des cycles de C et N des écosystèmes Arctiques en prenant en compte leur diversité.

Rôle des interactions bactériennes dans la dynamique des MO des ferralsols agricoles malgaches en fonction des amendements et des populations des vers de terre

Arthur Cousson * ¹, Damase Razafimahafaly ², Onja Ratsiatosika ², Sariaka Raharijaona ², Toky Randriantsoa ², Tantely Razafimbelo ², Eric Blanchart ¹, Laetitia Bernard ¹

¹ UMR EcoSols – Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMREcoSols – France

² Laboratoire des RadioIsotopes – Madagascar

Le sol est le puit de carbone terrestre le plus important de notre planète. La majorité de ce carbone est stocké sous la forme de matière organique (MO). Les microorganismes tels que les Bactéries, les Champignons et les Archées sont les premiers décomposeurs de la MO dans le sol. Les difficultés techniques liées à leur étude, observation, isolement et culture les ont amenés à être considérés comme une boîte noire fonctionnelle. L'avènement des approches de biologie moléculaire a permis d'en apprendre plus sur l'identité des populations et leurs fonctions à l'origine de la dynamique des MOS. Pour autant si ces méthodes permettent d'appréhender la richesse, la structure, la répartition et la fonctionnalité des communautés microbiennes, elles ne permettent pas de renseigner sur l'importance et le rôle des interactions entre les différents taxon sur cette dynamique. Il apparaît plausible que les interactions bactériennes aient un impact important sur le devenir des matières organiques du sol (MOS).

Les réseaux de co-occurrence sont des outils analytiques permettant d'approcher les potentielles interactions entre les organismes considérés. De ces réseaux, plusieurs métriques peuvent être tirées comme le degré moyen du réseau, le nombre de clusters, la densité des liens, l'ordre, le diamètre, la longueur moyenne de chemin minimal, la modularité etc. Ces métriques décrivent des caractéristiques générales du réseau traduisant la complexité, le nombre ou encore la densité d'interactions potentielles au sein de l'écosystème étudié. De plus, les organismes le composant peuvent être catégorisés en fonction de leur place au sein de ce réseau : Module hubs, Connecteurs, Périphériques et Connecteurs de réseaux.

Notre avons travaillé sur des échantillons de sol provenant de notre site expérimental de riziculture pluviale sur Ferralsol dans la région d'Itasy, sur les Hauts Plateaux de Madagascar. Cet essai en 4 blocs, démarré en 2018, vise à étudier la restauration des fonctions du sol par l'apport de MO de qualité variées, seules ou en mélange et associées à des matières minérales disponibles localement. Les échantillons issus de 10 modalités de l'essai ont été analysés par métabarcoding 16S sur MinIon afin de construire le réseau de co-ocurrence. Les métriques du réseau ont été reliées à d'autres paramètres agronomiques (Diversité de nombre et de quantité d'amendements organiques rendements, croissance des plants etc.), pédologiques (RockEval, CHN), faunistiques

*Intervenant

(Vers de terre, macro/microfaune du sol) et microbiologiques (Mesures d'activités bactériennes : EcoPlates Biolog).

Nous avons observé des corrélations positives intéressantes entre la nature des amendements organiques, la densité en vers de terre et la densité d'interactions potentielles au sein du réseau écologique. Les corrélations, positives et négatives, observées entre les métriques du réseau et les déterminants agronomiques, biotiques et abiotiques nous permettent de réfléchir à l'interprétation de ces métriques en terme d'écologie fonctionnelle et dans le cadre de tentatives de restauration des fonctions écologiques de sols agronomiques peu productifs.

Rôle de la biodiversité sur la dynamique de la matière organique du sol : cadre conceptuel, avancées méthodologiques et futures étapes

Nicolas Fanin * ¹

¹ Bordeaux Sciences Agro, UMR 1391 ISPA – INRAE – France

La biodiversité joue un rôle crucial dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres, et les avancées récentes dans les domaines de l'écologie moléculaire et de la biogéochimie ont permis d'approfondir notre compréhension des interactions complexes entre la matière organique du sol et les êtres vivants (plantes, microorganismes, faune...). En particulier, le développement rapide des approches en 'omics', en métabarcoding et en ADN environnemental au cours des dernières décennies nous a permis une caractérisation plus fine de la diversité spécifique et fonctionnelle des communautés microbiennes (bactéries, champignons...) et de la faune du sol (nématodes, vers de terre...), mettant ainsi en lumière le rôle central de la diversité multi-trophique dans les processus de décomposition et de minéralisation de la matière organique du sol. Parallèlement, les avancées en isotopie et en analyse biochimique de la matière organique nous ont offert des outils puissants pour tracer l'origine et le devenir des molécules organiques dans les sols. En particulier, le suivi de traceurs isotopiques et une meilleure caractérisation des molécules organiques par des approches innovantes comme la pyrolyse couplée à la spectrométrie de masse (pyro-MS) nous ont permis de quantifier les contributions des différentes sources de matière organique, qu'elles soient d'origine microbienne ou végétale, et de comprendre les mécanismes sous-jacents à leur transformation. Enfin, en couplant puissance de calcul, bases de données et modèles de prédiction, l'essor des outils en bio-informatique nous a permis d'identifier rapidement les organismes clés et leurs groupements au sein de réseaux d'interactions complexes, et ce dans le but de mieux prendre en compte le rôle des interactions biotiques sur les flux entrants et sortants de matière organique dans les sols. Toutes ces avancées, qu'elles soient conceptuelles, technologiques ou méthodologiques, ont contribué à une meilleure prise en compte du rôle de la diversité fonctionnelle des plantes et des organismes du sol dans la dynamique de la matière organique. Les futurs modèles prédictifs devront intégrer plus efficacement le rôle de la biodiversité et de ses interactions, surtout si l'objectif est d'améliorer la prédiction des flux et des stocks de matière organique entre différents types de sols, écosystèmes et à diverses échelles spatiales et temporelles.

*Intervenant

Diversité et rôles des microorganismes telluriques dans les processus de décomposition des matières organiques fongiques de qualité biochimiques contrastées

Elsa Hilaire * ¹, Aurélie Cébron ², Michaël Danger ², Marie-France Dignac ³, Bernhard Zeller ⁴, Marc Buée ¹

¹ Interactions Arbres-Microorganismes – Université de Lorraine, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

² Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux – Institut Ecologie et Environnement - CNRS Ecologie et Environnement, Institut National des Sciences de l’Univers, Observatoire Terre et Environnement de Lorraine – France

³ Institut d’écologie et des sciences de l’environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

⁴ Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers – Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

En forêt, la décomposition de la matière organique (MO) végétale est un processus majeur alimentant les cycles biogéochimiques. Une part importante de ce carbone organique est incorporée par les microorganismes responsables de sa décomposition, en particulier les champignons. En conséquence, ils vont produire une nécromasse de qualité chimique variable, elle-même dégradée par les communautés microbiennes du sol. Par une approche pluridisciplinaire (biochimie, biogéochimie et écologie microbienne), cette étude vise à décrire la dynamique de décomposition de la MO microbienne (fongique) dans les sols forestiers. Nous avons quantifié la décomposition de différentes nécromasses fongiques, caractérisées par une qualité biochimique différente (concentration en mélanine et en C/N/P). Ces deux critères ont un rôle significatif dans le taux de décomposition de la nécromasse fongique dans le sol. De plus, nous avons caractérisé la succession des microorganismes impliqués dans la décomposition de la nécromasse fongique durant 6 mois et démontré que le pourcentage de mélanine et le C/P étaient négativement corrélés à la vitesse de dégradation de cette MO dans les sols forestiers. Une meilleure prise en compte de la composante microbienne tellurique devrait permettre d’améliorer notre compréhension des mécanismes de stabilisation du carbone dans les sols forestiers.

*Intervenant

Les traits des essences forestières déterminent la composition de la matière organique du sol en interaction avec le contexte pédoclimatique

Fadwa Khalfallah *^{1,2}, Marie-France Dignac³, Philippe Santenoise¹, An De Schrijver⁴, Arnaud Legout¹, Aino Smolander⁵, Elena Vanguelova⁶, Kris Verheyen⁷, Lars Vesterdal⁸, Bernd Zeller¹, Laurent Augusto⁹, Marc Buée², Delphine Derrien *¹

¹ Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers – INRAE – France

² Interactions Arbres-Microorganismes – Université de Lorraine, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

³ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

⁴ Research Center AgroFoodNature, HOGENT University of Applied Sciences and Arts Ghent – Belgique

⁵ Natural Resources Institute Finland (Luke) – Finlande

⁶ Forest Research [Great Britain] – Royaume-Uni

⁷ Forest Nature Lab, Department of Environment, Ghent University – Belgique

⁸ Department of Geosciences and Natural Resource Management [Copenhagen] – Danemark

⁹ Interactions Sol Plante Atmosphère – Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux-Aquitaine, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

La matière organique du sol (MOS) est un réservoir majeur de carbone dans les sols forestiers. Mais les informations quant à l'impact des essences d'arbres sur la forme sous laquelle la MOS s'accumule et sur la manière dont cela varie en fonction des conditions du site sont très lacunaires, ce qui entrave la mise en œuvre de pratiques de gestion forestière visant à optimiser le piégeage du carbone dans le sol.

Pour progresser dans ce domaine, nous avons prélevé des échantillons de sol dans cinq dispositifs expérimentaux européens testant l'effet des essences (common gardens) et les avons analysés par pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse (Py-GC/MS). Nous avons cherché à évaluer comment la capacité de fixation de l'azote des arbres (fixation de l'azote ou non), l'association mycorhizienne des arbres (arbusculaire (AM) ou ectomycorhizienne (ECM)) et le type d'espèce d'arbre (feuillus ou conifères) affectent la composition moléculaire de la matière organique du sol.

*Intervenant

Sous les arbres ayant la capacité de fixer l'azote, nous avons observé un enrichissement, attendu, en composés azotés et une signature microbienne plus forte dans les produits de pyrolyse dérivés des polysaccharides et contenant de l'azote que chez les essences ne fixant pas l'azote.

Sous les arbres associés des AM, nous avons constaté un enrichissement de la MOS en composés contenant de l'azote, provenant principalement d'une source microbienne, par rapport aux arbres associés aux ECM. Contrairement à l'idée répandue d'une dégradation plus rapide de la litière des essences associées aux AM, *la composition moléculaire des produits issus de la pyrolyse a mis en évidence un enrichissement* de la MOS en dérivés lignocellulosiques par rapport aux arbres associés aux ECM. La bioturbation favorisée sous les arbres associés aux AM a probablement facilité l'incorporation des résidus lignocellulosiques dans le sol et leur agrégation avec des particules fines.

Sous conifères, nous avons observé un appauvrissement en produits de pyrolyse dérivés de la lignine par rapport aux parcelles de feuillus, que nous attribuons à une activité lignolytique plus efficace des champignons saprotrophes. Nous avons également constaté un enrichissement en composés azoté et une signature microbienne plus forte des composés N et des produits de pyrolyse dérivés des polysaccharides. La plupart de ces effets n'ont pas encore été observés dans le site finlandais de l'étude.

Les effets des traits des essences sur la MOS étaient plus importants dans les sols à texture grossière dominés par des associations organo-minérales impliquant des oxydes mal cristallisés que dans les sols à texture fine dominés des associations organo-minérales impliquant des phyllosilicates. Indépendamment de l'essence, nous avons observé une opposition entre l'accumulation de la lignine et celle des aliphatiques liée aux formes d'association organo-minérales.

Par rapport aux déductions dérivées d'observations du sol forestier ou de l'analyse d'un seul proxy, l'empreinte moléculaire générée par la py-GC/MS fournit des informations sur le devenir contrasté des molécules dans le sol et apporte un éclairage mécaniste sur la manière dont la composition des MOS est liée aux traits des essences et aux propriétés du site.

Impact du *Rhododendron ponticum* sur la dégradation de la matière organiques des sols forestiers

Erwan Le Jeune * ¹

¹ Ecologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés - UMR CNRS 7058 – Université de Picardie Jules Verne : UMR7058, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7058, Université de Picardie Jules Verne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Les espèces invasives impactent les écosystèmes qu'elles envahissent en perturbant la séquestration du carbone à la fois à court terme en affectant les taux de production primaire et de décomposition, ainsi qu'à long terme en modifiant la composition des espèces. Les écosystèmes forestiers ne sont pas épargnés par les invasions biotiques. En raison de leurs productivités primaires élevées et de leurs capacités importantes de stockage du carbone, l'étude des invasions biotiques est un sujet majeur pour comprendre et anticiper le devenir du stockage de carbone dans ces écosystèmes.

La dégradation microbienne du substrat dépend de facteurs biotiques tels que la qualité du substrat et la composition de la communauté microbienne, ainsi que de facteurs abiotiques tels que la température et humidité. L'introduction d'espèce envahissante peut modifier l'action de ces facteurs en apportant des résidus organiques chimiquement distincts et en modifiant les conditions climatiques locales du peuplement.

Notre étude porte sur le *Rhododendron ponticum*, un arbuste forestier en cours d'invasion dans les Hauts-de-France. Nous émettons les hypothèses suivantes : 1) *R. ponticum* modifie les conditions de température et d'humidité du sol, limitant ainsi l'activité microbienne, 2) *R. ponticum* impacte la diversité fonctionnelle bactérienne, influençant ainsi la qualité de la dégradation de la litière.

Nous avons examiné 15 paires de stations envahies et non envahies réparties dans 6 massifs forestiers du nord de la France. Dans chacune des stations, nous avons matérialisé 4 points où des mesures de température, d'humidité, de pH du sol, de lumière au-dessus du sol et de végétation ont été réalisées. Les empreintes métaboliques ont été réalisées à l'aide du système ecoplates de Biolog pour évaluer l'impact du *R.ponticum* sur la diversité fonctionnelle des communautés bactériennes. La fonction de transformation du carbone a été évaluée en mesurant l'épaisseur des humus, le POXC, la respiration et la dégradation de sachets de thé selon le protocole TBI. Nos résultats indiquent que *R. ponticum* modifie significativement les conditions de lumière, de température et d'humidité du sol. La présence d'humus significativement plus épais dans les stations envahies montre que la fonction de transformation du carbone est perturbée. Contrairement à nos hypothèses, la diversité fonctionnelle bactérienne ne semble néanmoins pas affectée, et les sites envahis ne montrent aucune diminution de la capacité de dégradation de la matière organique et de la respiration du sol.

*Intervenant

Who is who in necromass formation and stabilization in soil? Unraveling the role of fungi and bacteria as complementary players of biogeochemical functioning.

Selina Lepori ^{*} ¹, Nadja Rohner ¹, Xingqi Li ², Xiaojuan Feng ², Rota Wagai ³, Viviana Loaiza ¹, David Sebag ⁴, Eric Verrechia ⁵, Daniel Nelson ⁶, Ansgar Kahmen ⁶, Pascal A. Niklaus ¹, Anna-Liisa Laine ⁷, Luiz A. Domeignoz-Horta ⁸

¹ Department of Evolutionary Biology and Environmental Studies – Suisse

² State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093 – Chine

³ Institute for Agro-Environmental Science, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba, 305-0856 – Japon

⁴ IFP Energies nouvelles – IFP Energies Nouvelles, IFP Energies Nouvelles – France

⁵ Faculty of Geosciences and the Environment, Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Lausanne, 1015 – Suisse

⁶ Department of Environmental Sciences – Botany, University of Basel, Basel, 4056 – Suisse

⁷ Research Centre for Ecological Change, Organismal and Evolutionary Biology Research Programme, Faculty of Biological and Environmental Sciences, University of Helsinki, Helsinki 00014 – Finlande

⁸ Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

Multiple global change drivers created a large carbon (C) debt in our soils. Further understanding microorganisms' role in the fate of C cycling through soils is crucial to understand the challenges related to SOM turnover. A microbial physiology parameter that can help understand the formation of microbial-derived SOC is carbon use efficiency (CUE). While we know that biotic and abiotic drivers influence CUE, it remains unclear how distinct communities and abiotic conditions influence the formation of microbial-derived SOC and its persistence in soils. Here, we combine distinct community inocula (a biotic factor) with different moisture conditions (abiotic factor) to manipulate the formation of microbial-derived SOC in a model soil, and in a follow up experiment we evaluated the persistence of this previously formed SOC to decomposition. We observed a significant interaction between microbial community composition and moisture on CUE, as CUE decreased in communities containing bacteria under low moisture, whereas the microcosms which consisted of fungi only were not affected by moisture. While we show that necromass formation reflects the microbial community composition, the SOC formed within the most complex community seems to be more resistant to decomposition compared to the SOC formed within the more simple communities. Moreover, fungal necromass shows to be more thermally-stable than bacterial necromass. Our findings reveal that while abiotic factors impact microbial physiology, the biological origin of SOM is the stronger driver explaining its persistence in this simple model soil.

*Intervenant

Apports de fumier et intégration de prairies temporaires dans les systèmes de culture : quels effets sur les teneurs en matières organiques et les communautés microbiennes (abondance, diversité et fonctions) des sols ?

Caroline Petitjean ^{*1}, Andy Laprie ^{1,2}, Vincent Manneville ³, Séverine Piutti ^{*2}

¹ UMR Silva – Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE – France

² UMR 1121 Laboratoire Agronomie et Environnement – Université de Lorraine, INRAE – France

³ Institut de l'élevage – Institut de l'élevage, Institut de l'élevage – France

Contexte

Parmi les différentes fonctions réalisées par les sols, la fertilité assurée, *via* les cycles des nutriments, l'apport d'éléments nutritifs aux plantes. La fertilité résulte d'un ensemble de processus biologiques conditionnés par des facteurs physiques et chimiques qui influencent la dynamique des matières organiques des sols (MOS).

Six dispositifs expérimentaux, situés dans différents contextes pédoclimatiques, ont permis d'étudier les effets de pratiques agricoles pouvant être mises en œuvre dans les systèmes de polyculture-élevage sur des variables en lien avec les MOS et leur décomposition. Nous présentons ici les résultats obtenus pour deux dispositifs expérimentaux.

Matériel & Méthodes

Les deux dispositifs expérimentaux retenus sont :

- celui du SOERE PRO à Colmar (68) (INRAE, site PRO'spective) pour les apports de fumier ;
- celui du SOERE ACBB à Lusignan (86) (INRAE) pour l'intégration de prairies temporaires.

Sur chaque dispositif, quatre modalités différentes sont comparées et répétées quatre fois, soit 32 parcelles au total (2 dispositifs x 4 modalités x 4 blocs).

*Intervenant

Des échantillons composites de sols (0-15 cm) ont été prélevés dans chaque parcelle et les paramètres suivants ont été mesurés :

- la teneur en carbone organique (méthode Anne et analyse Rock Eval) ;
- le carbone de la biomasse microbienne (fumigation-extraction) ;
- six activités enzymatiques microbiennes liées à la décomposition des MOS (protéases (colorimétrie), arginine et leucine aminopeptidases, β -glucosidases, arylsulfatases, phosphatases (fluorimétrie)) ;
- le rapport bactérie/champignon (qPCR 16S et ITS) ;
- la diversité bactérienne (metabarcoding).

Résultats

En accord avec de précédents travaux menés en France et à l'étranger, nos résultats confirment que les apports d'effluents d'élevage et l'intégration de prairies temporaires dans les systèmes de culture peuvent augmenter significativement les teneurs en MOS et, à moyen terme, certaines activités enzymatiques microbiennes impliquées dans la décomposition / minéralisation de ces matières organiques. Ces pratiques agricoles constituent donc, pour les systèmes d'élevage, des leviers d'actions pour renforcer les teneurs en MOS et le fonctionnement microbien des sols et, *in fine*, la fertilité des sols.

L'impact des vers de terre sur la minéralisation des matières organiques du sol éclaire d'un jour nouveau les classifications écologiques des vers de terre

Luna Vion-Guibert ¹, Yvan Capowiez ², Gonzague Alavoine ¹, Ludovic Besaury ¹, Olivier Delfosse ¹, Mickaël Hedde ³, Gwenaëlle Lashermes ^{* 1}

¹ FARE – Université de Reims Champagne Ardenne (URCA), Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – France

² EMMAH – Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, INRAE – France

³ EcoSols – INRAE, Institut de recherche pour le développement [IRD] : UMREcoSols, CIRAD : UMREcoSols, L'Institut Agro Montpellier SupAgro – France

Les vers de terre, considérés comme des ingénieurs des écosystèmes, contribuent à de nombreuses fonctions écologiques, en impactant les propriétés physicochimiques et biologiques du sol. Par leur activité de bioturbation, les vers de terre modifient la structure du sol et la répartition de ses différents composants. De plus, en ingérant du sol et en sécrétant du mucus, ils favorisent la mise en contact des microorganismes et des matières organiques, dans des conditions favorables à l'activité microbienne, stimulant ainsi la minéralisation du carbone et des nutriments par les microorganismes du sol. Si ces effets sont relativement connus pour les espèces agricoles dominantes, la diversité des habitats et des traits fonctionnels des vers de terre suggère que tous n'auront pas le même impact.

Récemment, Capowiez et al. (2024) ont proposé une classification des vers de terre en groupes fonctionnels (*sensu* Hedde et al. 2022) en lien avec la bioturbation (réorganisation des particules de sol). L'objectif de notre travail est d'étudier le lien entre les fonctions de minéralisation des matières organiques et de bioturbation du sol portées par les vers de terre. Précisément, il s'agit d'évaluer si les espèces de vers de terre appartenant à différents groupes fonctionnels de bioturbation ont un impact différent sur la minéralisation des matières organiques.

Six taxons de vers de terre ont été incubés dans des colonnes de terre, en présence de litière de luzerne : *Octodrilus complanatus* (anécique), *Lumbricus terrestris* (épi-anécique), *Aporrectodea caliginosa meridionalis* (épi-anécique), *Alollobophora chlorotica* (épi-endogé), *Octolasion cyaneum* (hypo-endogé), *Microscolex dubius* (intermédiaire). Après 6 semaines d'incubation, des images des réseaux de galeries ont été obtenues par scanner et analysées. Les colonnes ont ensuite été ouvertes et des prélèvements de sol ont permis de quantifier la minéralisation du carbone et de l'azote et l'abondance et la diversité des microorganismes dans différents compartiments du sol : les turricules (déjections de surface), la drilosphère (sol autour des galeries) et le " surrounding bulk " (sol non directement altéré par les vers de terre).

Les résultats sur l'activité de bioturbation des vers de terre sont cohérents avec ceux obtenus par Capowiez et al. (2024) et permettent de distinguer cinq groupes fonctionnels (*A. c. meridionalis*

*Intervenant

et *O. cyaneum* ne se distinguant pas l'un de l'autre). De manière générale, la présence de vers de terre induit une augmentation des teneurs en carbone et en azote et stimule leurs minéralisations dans les turricules mais impacte peu la drilosphère. Les mesures biogéochimiques et microbiologiques réalisées tendent à séparer les taxons étudiés en deux groupes : les espèces stimulant la minéralisation du carbone et de l'azote dans les turricules, par la sélection de bactéries (lors du passage dans le tube digestif) et le maintien d'une humidité élevée, et ceux ayant peu d'effets sur les communautés microbiennes et leur activité. De plus, les résultats montrent que *L. terrestris*, souvent utilisé comme ver "modèle" a un impact sur la structure du sol et sur la minéralisation des matières organiques plus élevé et différent de la majorité des autres taxons étudiés, et n'est donc pas représentatif du rôle des vers de terre sur les sols.

Origines et regeneration des biopores du sol en conditions pédoclimatique contrastées

Charlotte Védère *¹, Hanane Aroui Boukbida², Yvan Capowiez³, Sougheh Cheik⁴, Guillaume Coulouma⁵, Dinh Rinh Pham⁶, Séraphine Grellier⁷, Claude Hammecker⁵, Thierry Henry Des Tureaux⁸, Ajay Harit⁹, Jean-Louis Janeau⁸, Pascal Jouquet⁸, Jean-Luc Maeght¹⁰, Cornélia Rumpel¹¹, Abad Chabbi¹², Marie-Laure Decau¹³, Stéphane Sammartino¹⁴, Norbert Silvera², Siwaporn Siltecho¹⁵, Lofti Smaili², Bounsamay Soulileuth¹⁶, Nicolas Bottinelli⁶

¹ Institute of Ecology and Environmental Sciences- Paris (iEES-Paris) UMR CNRS, INRAE, IRD, Sorbonne University, Paris 75005, – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement – France

² Sorbonne Université, UPEC, CNRS, IRD, INRAE, Institute of Ecology and Environmental Sciences of Paris, iESS Paris, Centre IRD, 93143 Bondy – IRD – France

³ EMMAH, Avignon Université, INRAE, 84000 Avignon – EMMAH – France

⁴ Agronomy and Ecology Laboratory, Institute of Life Sciences, Centre d’Études et de Recherche de Djibouti, CERD – Djibouti

⁵ LISAH, Univ Montpellier, INRA, IRD, Montpellier SupAgro, Montpellier – LISAH – France

⁶ Soils and Fertilizers Research Institute (SFRI), Dong Ngac, Tu Liem, Hanoi, – Vietnam

⁷ Department of Spatial planning and Environment Engineering of Polytech Tours, CITERES UMR7324 CNRS, University of Tours, Tours – Université de Tours, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁸ Sorbonne Université, UPEC, CNRS, IRD, INRAE, Institute of Ecology and Environmental Sciences of Paris, iESS Paris, Centre IRD, 93143 Bondy – IRD – France

⁹ School of Environmental Sciences, Mahatma Gandhi University, PD Hills, Kottayam 656860, Kerala, – Inde

¹⁰ AMAP, Univ Montpellier, IRD, CIRAD, CNRS, INRAE, Montpellier – IRD – France

¹¹ Institute of Ecology and Environmental Sciences- Paris (iEES-Paris) UMR CNRS, INRAE, IRD, Sorbonne University, Paris 75005 – IEES – France

¹² INRAE, UR P3F, 86600, Lusignan, – INRAE – France

¹³ Institut National de Recherche Agronomique et Environnement (INRAE), Fourrages Environnement Ruminants Lusignan (UE 1373 FERLUS), 86600 Lusignan, – INRAE – France

¹⁴ EMMAH, Avignon Université, INRAE, 84000 Avignon, – EMMAH – France

¹⁵ Regional Office 5, Land Development Department, Khon-Kaen, – Thaïlande

¹⁶ IRD, Department of Agricultural Land Management (DALaM), Vientiane, Lao PDR – Laos

Les biopores jouent un rôle crucial dans l’organisation de la structure du sol, l’infiltration de l’eau et la circulation de l’air entre la surface et le sol profond. Malgré leur importance dans le fonctionnement du sol, il existe un manque de connaissances complètes sur la contribution des ingénieurs du sol à la formation de ces biopores et sur leurs taux de régénération sur le terrain. Dans ce but, nous avons cherché à étudier : (1) les relations entre les ingénieurs du sol, c’est-à-dire

*Intervenant

les vers de terre, les fourmis, les termites, les coléoptères et les mille-pattes, et les biopores et (2) l'utilisation potentielle de résidus de matière organique pour stimuler l'activité de la macrofaune et accélérer la génération de biopores. Notre approche expérimentale consistait à reconditionner des cylindres de sol dans des soil-bags afin de créer un volume de sol sans bioporosité, que les ingénieurs du sol pourraient alors coloniser. Les soil-bags ont été enterrés à la surface du sol de douze sites d'étude pédoclimatiques contrastés incluant cinq pays (France, Vietnam, Inde, Laos et Thaïlande) pendant un an.

Après 12 mois, le volume de biopores imagés et mesurés par tomographie aux rayons X dans les soil-bags a été comparé au volume de biopores mesuré dans des cylindres de sol témoins de chacun des sites d'étude. De plus, nous avons exploré les relations entre le volume et la forme des biopores générés dans les soil-bags avec les communautés d'ingénieurs des sols présentes ainsi que les conditions pédoclimatiques des sites.

Nous avons montré, dans la plupart des cas, une régénération complète du volume des biopores après 12 mois quels que soient l'ajout de résidus organiques ou les conditions pédoclimatiques. Les sites abritant une plus grande population de vers de terre présentaient les taux de régénération les plus élevés. L'analyse de co-inertie, permettant de comparer le diamètre et la complexité des biopores régénérés aux ingénieurs des sols, n'était pas statistiquement significative. Cela suggère que ni cette approche ni les paramètres 3D utilisés n'étaient adaptés pour identifier l'origine des biopores.

En conclusion, nos résultats ont démontré que les biopores se régénèrent rapidement, principalement par l'activité des vers de terre, quelles que soient les conditions pédoclimatiques. Cependant, comprendre la contribution spécifique des ingénieurs des sols aux biopores reste un casse-tête complexe à résoudre.

Influence des traits morphologiques, anatomiques, physiologiques et comportementaux des vers de terre tempérés sur les propriétés physico-chimiques des turricules.

Yacouba Zi ^{* 1}, Malaladiana Razafindrakot ², Ridge Antoun ¹, Nicolas Bottinelli ^{1,3}, Yvan Capowiez ⁴, Alessandro Florio ⁵, Chao Song ¹, Marie-France Dignac ¹, Cornélia Rumpel ¹

¹ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

² Laboratoire des RadioIsotopes – Madagascar

³ Department of Soil sciences, Soils and Fertilizers Research Institute (SFRI), Hanoi, Viet Nam – Vietnam

⁴ Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes – Avignon Université, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

⁵ Université Claude Bernard Lyon 1 – Université de Lyon – France

Les vers de terre jouent un rôle majeur dans les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote grâce à leur activité de bioturbation et de production de turricules. Ils influencent ainsi les émissions de gaz à effet de serre notamment le N₂O et le CO₂, ainsi que la séquestration du carbone à travers leur influence sur les processus de protection de la matière organique du sol. Il a été montré récemment que les turricules de vers de terre de différentes espèces présentaient des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques contrastées, même lorsque celles-ci appartiennent à la même catégorie écologique (Le Mer et al., 2022). Nous avons émis l'hypothèse que les traits spécifiques des vers de terre pourraient déterminer leur réponse aux changements environnementaux et leurs effets sur les processus écologiques (Capowiez et al., 2023). Ainsi, l'objectif de ce travail était d'étudier le rôle des traits fonctionnels des vers de terre dans la dynamique de la matière organique. Nous avons réalisé une expérience en laboratoire pour évaluer l'effet des traits 9 espèces de vers de terre de la famille des Lumbricidés sur la nature, la protection et la composition chimique moléculaire de la matière organique dans les turricules de vers de terre. Nous avons séparé la matière organique particulaire (POM) et la matière organique associée aux minéraux (MAOM) à travers la technique de fractionnement physique. La nature et la composition chimique moléculaire de la matière organique dans les turricules ont été déterminées à partir d'analyses élémentaires, isotopiques et de spectres infrarouge moyen. Les résultats ont montré une forte corrélation entre les paramètres physiques et chimiques (c'est-à-dire le carbone organique dissous, la matière organique particulaire, le carbone total, le rapport

*Intervenant

C/N et les teneurs en azote) et la taille du ver de terre, le gésier, le pharynx, la pigmentation, le faible dissépinement et la quantité de litière ingérée. Nous concluons que les traits spécifiques des vers de terre peuvent être utilisés pour prédire leur effet sur la dynamique de la matière organique. Mots clés : gaz à effet de serre, vers de terre, turricules, trait fonctionnel

Traçage de la matière organique d'origine terrigène en milieu aquatique : développement de nouveaux marqueurs moléculaires d'origine bactérienne

Zhe-Xuan Zhang ¹, Edith Parlanti ², Christelle Anquetil ¹, Jérôme Morelle ³,
Annet Laverman ⁴, Alexandre Thibaut ⁵, Elisa Bou ⁶, Arnaud Huguet ^{*1}

¹ Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols – Ecole Pratique des Hautes Etudes, Institut National des Sciences de l'Univers, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques – Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers, Université Sciences et Technologies - Bordeaux 1, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Ecole Pratique des Hautes Etudes – France

³ Centre for Environmental and Marine Studies [Aveiro] – Portugal

⁴ Ecosystèmes, biodiversité, évolution [Rennes] – Université de Rennes, Institut Ecologie et Environnement - CNRS Ecologie et Environnement, Centre National de la Recherche Scientifique, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes – France

⁵ ANTEA GROUP – ANTEA GROUP, ANTEAGROUP – France

⁶ Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement – Institut Ecologie et Environnement - CNRS Ecologie et Environnement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Institut National Polytechnique (Toulouse) – France

Au cours de ces quinze dernières années, les alkyl tetraéthers de glycérol ont fait l'objet d'un intérêt grandissant car il a été montré que la distribution de ces composés variait avec les conditions environnementales (température et pH principalement). Ils se révèlent donc être des outils particulièrement prometteurs pour la reconstruction des environnements passés et sont très utilisés en paléoclimatologie. Deux familles de tetraéthers existent, la première étant biosynthétisée par les archées, la seconde par des bactéries encore non identifiées.

Les tetraéthers d'origine bactérienne sont constituées de chaînes alkyles ramifiées, cycliques ou acycliques. Ils ont été détectés dans l'ensemble des milieux naturels, terrestres et aquatiques. Ils présentent une grande diversité de structures. Les tetraéthers à chaînes dialkyles ont été principalement étudiés à ce jour et constituent les seules molécules d'origine microbienne qui peuvent être utilisées par les paléoclimatologues pour reconstruire les variations de température passées dans tous les milieux continentaux (sols et lacs). Cependant, d'autres composés dérivés de ces derniers – tetraéthers à chaînes monoalkyles, dont la structure exacte reste à préciser, ont récemment été proposés comme marqueurs de température potentiels dans les lacs. Peu d'informations sur les tetraéthers à chaînes monoalkyles sont disponibles à ce jour.

Au cours de ce travail, nous avons cherché à mieux contraindre les sources des tetraéthers bactériens à chaînes monoalkyles et dialkyles et les facteurs environnementaux influençant leur

*Intervenant

distribution le long du bassin de la Seine, en particulier dans l'estuaire, zone de transition entre le continent et l'océan. Nous avons démontré que ces composés étaient produits *in situ*, aussi bien dans les eaux douces que dans les eaux salées. Les analyses statistiques réalisées (analyses de redondance) ont révélé l'influence prédominante de la salinité et de la teneur en nutriments azotés sur la distribution en tétraéthers à chaînes dialkyles, avec une production préférentielle de certains composés (présentant un groupement méthyle en position 6) dans les zones de faible salinité et forte productivité. A l'inverse, la distribution des tétraéthers bactériens à chaînes monoalkyles est majoritairement liée à la salinité, avec une influence distincte sur les différents composés (i.e. corrélation positive ou négative de l'abondance relative de ces derniers avec la salinité).

Sur la base de la production préférentielle d'une partie des tétraéthers à chaînes monoalkyles en eaux douces et l'autre en eaux salées, nous avons proposé un nouveau marqueur moléculaire (Riverine Index, RIX) pour tracer les apports de MO provenant de la rivière à l'estuaire. Le potentiel de cet indice a été démontré après application à des échantillons contrastés (époque moderne, bassin de la rivière Godavari, Inde ; archive sédimentaire marine provenant du bassin Arctique).

Thème 6 : Modélisation à toutes les échelles



CAMMISOL: couplage multi-agents de modèles mathématiques et informatiques pour la simulation du bio-fonctionnement des sols.

Paul Breugnot * ¹, Nicolas Marilleau ¹, Laetitia Bernard ²

¹ Unité de modélisation mathématique et informatique des systèmes complexes [Bondy] – Institut de Recherche pour le Développement – France

² Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Institut de Recherche pour le Développement, Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement, Institut Agro Montpellier – France

La compréhension des mécanismes qui régissent la dynamique des matières organiques (MO) du sol est essentielle à la lutte contre le changement climatique ainsi qu’à la restauration et/ou la préservation de sa fertilité à courts et longs termes. C’est d’autant plus une nécessité dans les pays du Sud qui subissent une forte pression démographique alors que l’agriculture sensée nourrir les populations en expansion repose sur (1) des sols anciens généralement très pauvres en nutriments N et P indispensables à la croissance des cultures et sur (2) l’utilisation de fertilisants organiques disponibles localement. Cependant, le sol est un environnement riche et complexe, et l’expérimentation atteint souvent ses limites pour décrire notamment l’effet des interactions entre les différentes composantes du sol et même entre les différents éléments d’une même composante. La modélisation est un outil intéressant qui peut être complémentaire de l’expérimentation pour tester des hypothèses lorsque les techniques analytiques ne permettent pas de différencier des flux issus de différents processus. C’est dans cet esprit que nous avons construit le modèle multi-agents CAMMISOL dans le cadre d’un projet en partenariat avec Madagascar.

La vie du sol s’articule notamment autour de la dynamique entre différents compartiments de trois éléments: le carbone (C), l’azote (N) et le phosphore (P). L’objectif du modèle CAMMISOL consiste à simuler l’évolution de la disponibilité de ces éléments en fonction des paramètres intrinsèques des sols et des amendements et prélèvements qui y sont effectués.

CAMMISOL se base notamment sur des modèles mathématiques et informatiques issues de la littérature et de notre propre expertise pour simuler des phénomènes biologiques et chimiques tels que (1) la fixation des composants organiques ou minéraux (P) sur les phases minérales (pour donner la MAOM), (2) l’activité enzymatique des divers groupes fonctionnels de microorganismes afin de décomposer les MO labiles et biochimiquement récalcitrantes, ou encore (3) la boucle microbienne.

Leur intégration à un modèle multi-agents spatialisé permet alors de simuler les comportements d’entités autonomes jouant un rôle clé dans la vie du sol, parmi lesquelles les nématodes, les populations de microbes, les plantes ou les humains. Les observations effectuées permettent à la fois de déduire l’état global du sol et d’analyser les interactions et les échanges de matières entre

*Intervenant

les différentes entités, tout en prenant en compte l'hétérogénéité spatiale du milieu simulé.

Un exemple d'application consiste en la conception d'une interface de simulation interactive permettant d'estimer la production d'un sol agricole en fonction de la nature du sol, de la qualité des amendements effectués et de l'exportation des nutriments par les cultures.

Le modèle conçu est disponible en *Open Source* et proposé dans l'atelier collaboratif n°3.

Estimation de la capacité de stockage additionnelle de carbone organique à horizon 2050 à l'échelle d'un petit territoire, en fonction du type de sol et de la profondeur

Clémentine Chirol ^{1,2}, Geoffroy Séré ¹, Laurent Saint-André ³, Paul Olivier
Redon ⁴, Claire Chenu ², Delphine Derrien * ³

¹ LSE – Université de Lorraine, INRAE – France

² Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes – AgroParisTech, INRAE - Université
Paris-Saclay – France

³ Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers – INRAE – France

⁴ ANDRA - Direction Scientifique – ANDRA – France

Les projets d'aménagement visant à maximiser les stocks de carbone organique du sol (COS) sont de plus en plus nombreux. En réponse, un nombre croissant d'études évaluent les capacités de stockage additionnel du COS à des échelles spatiales régionales et mondiales. Il est nécessaire de questionner la pertinence de différentes approches d'estimation du stockage additionnel de carbone dans les sols, en considérant l'effet de différents types de sol sur la répartition verticale du carbone, et en explorant les horizons temporels nécessaires pour atteindre cette capacité de stockage additionnel.

Ce projet estime et cartographie les stocks et potentiels de stockage additionnel du carbone à l'échelle d'un territoire de 320 km² dans le Nord-Est de la France. Sur ce territoire, huit types de sol contrastés ont été identifiés, caractérisés et cartographiés sur la base d'une forte densité de profils pédologiques précédemment décrits par l'OPE (Observatoire Pérenne de l'Environnement) de l'Andra. Des profils continus des stocks de COS ont été interpolés pour chaque type de sol et chaque utilisation des terres (sols cultivés, prairies ou forêts). Nous avons comparé les estimations de profils verticaux de capacité de stockage additionnel du COS en utilisant l'équation de Hassink et une approche basée sur les percentiles supérieurs des données de stock de COS existantes pour cette région. Nous avons développé un modèle dynamique du COS sur l'ensemble du profil de sol afin de simuler l'évolution des stocks de COS sur 25 ans. Ces informations, combinées à des cartes pédologiques et d'utilisation des sols, ont permis d'obtenir une répartition spatiale et verticale des stocks de COS, de la capacité de stockage additionnel et de la dynamique du COS.

Les stocks de COS et les capacités de stockage additionnel sont très hétérogènes en fonction des types de sol dans la région étudiée. Les stocks médians de COS varient de 78 à 333 tC ha⁻¹, dont 59 à 148 tC ha⁻¹ contenus dans les 30 premiers centimètres. Les estimations des capacités de stockage additionnel basées sur l'approche de Hassink ont conduit à des distributions verticales irréalistes des stocks de COS, avec une forte surestimation dans les horizons profonds. Les capacités de stockage additionnel de COS déterminées par la méthode des percentiles des données de la région varient de 19 tC ha⁻¹ pour les sols forestiers rocheux peu profonds à 197 tC

*Intervenant

ha-1 pour les Gleysols agricoles.

L'accumulation de COS simulée sur 25 ans était cinq fois inférieure à la capacité de stockage additionnel théorique totale dans la région (0.6 et 2.5 MgC respectivement). Un examen plus approfondi de la dynamique du COS en fonction de la profondeur dans différents types de sol est donc nécessaire pour fournir aux parties prenantes des objectifs de stockage de COS sur des échelles de temps pertinentes avec les politiques publiques visant la neutralité carbone pour 2050.

Modélisation de l'évolution des stocks de carbone organique dans les sols : travaux et perspectives de recherche autour du modèle AMG

Hugues Clivot * ¹, Fabien Ferchaud ², Bruno Mary ³, François Baudin ⁴,
Lauric Cécillon ^{5,6}, Nicolas Delpierre ⁷, Bertrand Guenet ⁵, Mojtaba
Houballah ⁷, Eva Kanari ^{4,5,8,9}, Gwenaëlle Lashermes ¹, Julia Le Noë ¹⁰,
Florent Levavasseur ¹¹, Marija Stojanova ⁵, Antoine Versini ¹², Qi Wang
^{5,13}, Pierre Barré ⁵

¹ Fractionnement des AgroRessources et Environnement – Université de Reims Champagne-Ardenne, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

² Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Institut de Recherche pour le Développement, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – France

³ Transfrontalière BioEcoAgro - UMR 1158 – Université d'Artois, UNiversité de Liège, Université du Littoral Côte d'Opale, Université de Lille, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Junia – France

⁴ Institut des Sciences de la Terre de Paris – Institut National des Sciences de l'Univers : UMR7193, Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7193, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁵ Laboratoire de géologie de l'ENS – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris – France

⁶ Etude et Compréhension de la biodiversité – Université de Rouen Normandie, INRAE – France

⁷ Ecologie Systématique et Evolution – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁸ EK Department of Forest Sciences, University of Helsinki – Finlande

⁹ EK Institute for Atmospheric and Earth System Research / Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki – Finlande

¹⁰ Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris – Institut de Recherche pour le Développement, Sorbonne Université, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

¹¹ Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes – AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

¹² Recyclage et risque – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement – France

¹³ College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu – Chine

*Intervenant

AMG est un modèle simple simulant l'évolution du carbone organique du sol (COS) au pas de temps annuel et à l'échelle d'une parcelle agricole. AMG a été initialement décrit par Andriulo et al (1999) qui ont proposé une évolution du modèle à 2 compartiments d'Hénin-Dupuis (1945) vers un modèle à 3 compartiments de matière organique (MO) avec 1) la MO fraîche (MOF) provenant des résidus de cultures ou d'amendements organiques, 2) le COS actif qui se minéralise et qui est alimenté par la décomposition de la MOF et 3) le COS stable considéré comme inerte à l'échelle du siècle. D'une apparente simplicité, AMG intègre cependant de nombreuses fonctions de réponses à des facteurs pédoclimatiques (effets de la texture et physico-chimie du sol, de la qualité des matières organiques, de la température, de l'humidité du sol) et intègre implicitement le fonctionnement microbien associé à la décomposition des MO.

AMGv2 a été évalué sur plus d'une centaine de traitements expérimentaux en grandes cultures ou jachères nues de longue durée, répartis sur une trentaine de sites en France et en Europe (Clivot et al 2019, Levavasseur et al 2020, Farina et al 2021). Cette version a montré de très bonnes capacités de prédiction des dynamiques du COS dans divers contextes agropédo-climatiques et ainsi une bonne généralité, avec des erreurs relatives moyennes (RRMSE) entre 5 et 10 %, proches de l'incertitude de mesure sur les stocks de COS.

Des travaux récents, basés sur des expérimentations en France (Kanari et al 2022) et en Chine (Wang et al 2023), ont également montré que les capacités de prédiction d'AMG pouvaient être encore améliorées par une initialisation du compartiment stable de COS via une estimation dérivée d'une analyse thermique de sol Rock-Eval® (Cécillon et al 2021). Des travaux en cours visent à consolider cette approche combinée sur une plus large gamme de situations pédo-climatiques.

Des limites du modèle ont notamment été identifiées en systèmes tropicaux, en particulier pour les andosols et les systèmes recevant d'importants apports de MO exogènes, et dont certains montrent un stockage de C important en profondeur (Acosta-Alba et al 2023). La prise en compte des propriétés minéralogiques de ces sols, du transport vertical de MO dans le profil de sol, ainsi que la simulation des horizons profonds sont des pistes identifiées d'amélioration d'AMG. Une version modifiée, incluant un effet priming et une discrétisation verticale des entrées de C dans le sol (Mary et al 2020), s'est révélée capable de simuler de manière satisfaisante les évolutions de stocks de C dans les différents horizons de sols d'un essai de 47 ans en non-travail du sol. Cette approche doit être évaluée de manière plus large et représente également une opportunité de simuler aussi bien les horizons de surface que les horizons en profondeur avec des entrées de C et un fonctionnement biologique différenciés.

Enfin, des travaux en démarrage dans le programme FairCarboN s'intéresseront à identifier si les sols de différents écosystèmes terrestres diffèrent dans leur fonctionnement microbien et, avec l'appui de modèles mécanistes, à évaluer la possibilité d'adapter et transposer l'approche AMG dans d'autres systèmes comme les prairies ou encore les forêts, dans la continuité de travaux récemment engagés (Houballah et al 2023).

Le priming effect comme un exemple de changement d'échelle : de l'observation en laboratoire à la modélisation à l'échelle globale

Bertrand Guenet * ¹

¹ Laboratoire de géologie de l'ENS – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris – France

Le priming effect est défini comme un changement dans le taux de minéralisation de la matière organique du sol (MOS) induit par des ajouts de matière organique fraîche (MOF). Bien que les mécanismes contrôlant ce phénomène soient connus depuis longtemps, ils sont encore mal identifiés. Néanmoins, de nombreuses observations montrent l'importance du priming effect dans le bilan du carbone du sol. Ceci suggère qu'il devrait être pris en compte par les modèles à grande échelle, en particulier les modèles de surface qui sont intégrés dans les modèles du système Terre. Cependant, la compréhension fragmentaire du phénomène rend difficile sa mise en équation et donc son intégration dans les modèles. Comme tous les phénomènes qui se produisent à une échelle très fine, le passage à une grande échelle pose des problèmes de calibration des paramètres. Pour être intégré dans un modèle à grande échelle, un processus doit répondre à un certain nombre de contraintes, telles que i) l'ubiquité du phénomène, ii) son importance quantitative dans les échanges de matière entre compartiments et iii) la possibilité de le représenter par des équations et des paramètres associés suffisamment robustes pour être vérifiés dans tous les biomes du monde. Dans ce contexte, le priming effect représente un défi majeur, car il n'existe pas encore de consensus sur sa mise en équation. Pour surmonter cette limitation, nous avons développé une approche semi-empirique visant à reproduire le priming effect à l'aide d'une équation simple nécessitant peu de paramètres. Ainsi, nous avons ajouté au schéma en cinétique du premier ordre classiquement utilisé dans de nombreux modèles, une fonction modulant le taux de décomposition de la MOS en fonction de la disponibilité de la MOF. L'équation a été calibrée sur une base de données contenant un grand nombre d'incubations destinées à mesurer le priming effect. Nous avons ensuite évalué cette nouvelle approche sur un autre ensemble de données d'incubation indépendant. Nous avons ensuite intégré ce schéma dans le modèle de surface ORCHIDEE et évalué cette nouvelle version du modèle en la comparant avec des mesures de flux de respiration hétérotrophe obtenues à partir d'expériences de manipulation de litière en forêt. Le modèle ayant donné des résultats satisfaisants à cette échelle, nous avons simulé l'évolution des stocks de carbone du sol du 20^e siècle à 2100 selon deux scénarios de changement climatique. En comparant nos simulations avec la version standard d'ORCHIDEE, nous avons pu estimer que le priming effect à l'échelle mondiale pourrait réduire les capacités de stockage de carbone du sol d'environ 50% soulignant l'importance de sa prise en compte dans les modèles du système Terre.

*Intervenant

Proposition d'un prototype pour le monitoring à large échelle et haute résolution des composantes du bilan carbone des parcelles de grandes cultures

Ainhoa Ihasusta *¹, Ludovic Arnaud¹, Ahmad Al Bitar¹, Pierre Barré²,
Ceschia Eric¹

¹ Centre d'études spatiales de la biosphère – Institut de Recherche pour le Développement, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

² Laboratoire de géologie de l'ENS – Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique, Département des Géosciences - ENS Paris – France

Quantifier les variations de stocks de carbone organique du sol (COS) des terres agricoles représente un enjeu majeur (Minasny et al 2017). Paustian et al. (2019) et Smith et al. (2020) ont proposé des cadres théoriques pour la surveillance, la déclaration et la vérification (MRV : Monitoring, Reporting, Verification en anglais) des variations de stocks de COS dans les sols agricoles pour différents contextes. Pour quantifier ces variations de l'échelle de la parcelle à l'échelle globale, les approches hybrides combinant des informations de terrain, des modèles physiques et des méthodes d'assimilation de données de télédétection à haute résolution apparaissent particulièrement prometteuse (Batjes et al. 2023).

Dans cette étude, nous proposons d'évaluer la chaîne de traitement AgriCarbon-EO (Wijmer et al 2023) qui assimile des images satellites optique dans le modèle agrométéorologique SAFYE-CO2 (Pique et al. 2020 a & b) pour produire des estimations à haute résolution (10m) et à grande échelle des composantes des bilans de carbone et d'eau (ex. biomasse, rendement, évapotranspiration, flux de CO2) ainsi que leur incertitude. Les simulations de biomasse peuvent ensuite être utilisées comme données d'entrée pour des modèles de sol afin d'évaluer les impacts de la restitution de biomasse au sol sur les dynamiques de COS. Nous avons choisi le modèle AMG qui est utilisé dans le cadre du Label Bas Carbone pour sa simplicité d'implémentation et sa fiabilité (Clivot et al 2019, Le Noë et al 2023). L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le gain en précision sur le calcul des bilans C spatialisés apporté par l'utilisation conjointe de SAFYE-CO2 et d'AMG. En effet, les approches classiques de mise en œuvre d'AMG se basent généralement sur des données de rendements moyens à la parcelle, sources de fortes incertitudes.

Pour ce faire, différents exercices de simulation ont été réalisés. Tout d'abord sur des parcelles situées dans le Gers (France) et sur lesquelles des cultures intermédiaires ont été semées, avec une majorité de méteils. Ici nous comparons les résultats de SAFYE-CO2/AMG avec les résultats obtenus en utilisant des statistiques régionales de biomasses de cultures intermédiaires fournies par la chambre d'Agriculture du Gers. Le modèle estime des biomasses entre 5 et 15

*Intervenant

tMS/ha (avec un biais moyen de 1.28 tMS/ha par rapport aux 11 parcelles sur lesquelles des mesures ont été effectuées) là où les statistiques rapportent des valeurs comprises entre 5 et 8 tMS/ha.

Nous avons aussi réalisé des exercices de simulation sur le site de Piacenza situé dans la vallée du Pô (Italie). Il comprend 5 parcelles expérimentales caractérisées par des apports contrastés de matière organiques au sol. Dans ce cas, 4 scénarii de simulation ont été testés où le C restitué au sol est calculé soit à partir de rendements moyens à la parcelle soit avec la biomasse simulée au pixel, combiné à des propriétés du sol soit moyennées à la parcelle soit au pixel.

Les résultats de cette étude nous permettront d'évaluer l'impact de la précision des données dont on dispose en entrée des modèles sol, sur l'estimation de la dynamique du stock de carbone dans les sols. Ainsi, nous pourrions identifier les méthodes de Monitoring du C du sol qui s'accordent le mieux aux types de données disponibles.

Modélisation de la réactivité des mélanges complexes d'hydrocarbures en milieu géologique.

Raymond Michels ^{*1}, Valérie Burklé-Vitzthum ², Roda Bounaceur ²,
Catherine Lorgeoux ^{*1}

¹ GeoRessources UMR 7359 – GeoRessources, UMR 7359 CNRS-UL – France

² Laboratoire Réactions et Génie des Procédés – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7274 / UPR3349 – France

Dans les bassins sédimentaires, les transformations des roches sous l'effet de l'enfouissement dans le sous-sol géologique sont notamment décrites par des interactions chimiques entre les fluides aqueux et les minéraux. Cependant très peu de modèles réactionnels incluent la réactivité de la matière organique complexe. La structure et la complexité des kérogènes et des mélanges d'hydrocarbures posent ainsi un challenge à la modélisation. Une méthodologie permettant d'étudier les transformations des kérogènes et des hydrocarbures en profondeur est la pyrolyse sous haute pression en capsules d'or (aussi appelée pyrolyse confinée) qui permet de reconstituer les principales étapes de transformations des matières organiques observées dans les bassins sédimentaires. Cependant, pour observer des réactions dans des temps raisonnables, il est nécessaire d'employer des températures plus élevées qu'en milieu naturel : 250°C et 450°C pendant quelques heures à quelques jours contre $T < 250^\circ\text{C}$ sur plusieurs millions d'années. Pour extrapoler les données expérimentales aux conditions temps/températures géologiques il est alors nécessaire de recourir à la modélisation cinétique.

Notre modèle cinétique est ainsi basé sur des combinaisons de processus radicalaires élémentaires. L'écriture des processus élémentaires fait suite à l'analyse des produits de réactions obtenus à partir de la pyrolyse de produits purs et de leurs mélanges, et utilise une méthodologie propre aux réactions radicalaires. A ces processus élémentaires sont associés des paramètres cinétiques fondamentaux déterminés soit par la littérature, soit par le calcul. L'ensemble des processus élémentaires et de leurs paramètres cinétiques constituent un modèle réactionnel numérique. Ce dernier permet de prendre en compte explicitement les réactions croisées (processus élémentaires impliquant des espèces chimiques issus de familles réactives différentes). On obtient ainsi un réseau réactionnel qui peut être assimilé à un réacteur informatique (jumeau numérique).

Nous présenterons ainsi les avantages de l'utilisation d'un modèle cinétique basé sur l'écriture explicite des réactions chimiques organiques afin de comprendre le comportement des mélanges d'hydrocarbures en expérimentation et aux conditions géologiques. Nous traiterons quelques exemples. Il a ainsi été montré que les alkylaromatiques et les hydroaromatiques ralentissaient le craquage thermique des alcanes dans les conditions de laboratoire et que cet effet inhibiteur s'amplifiait de manière exponentielle aux températures géologiques. De même, il a été montré

*Intervenant

que H₂S inhibait le craquage des alcanes dans les conditions de laboratoire, mais l'accélérait aux températures géologiques. Seuls des modèles cinétiques détaillés peuvent mettre en évidence de tels comportements. Enfin, des modèles de fluides pétroliers complexes ont pu être construits, mettant en évidence l'interconversion des différentes familles chimiques, notamment, les alcanes, naphthènes et aromatiques.

Optimisation de la productivité du riz pluvial à Madagascar : Assemblage des matières fertilisantes organiques et minérales à l'aide d'un modèle combinatoire

Manoa Raminoarison *¹, Benoît Jaillard ², Tantely Razafimbelo ¹, Koloina Rahajaharilaza ¹, Eric Blanchart ², Tiphaine Chevallier *², Laetitia Bernard *², Jean Trap ²

¹ Laboratoire des RadioIsotopes – Madagascar

² Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Institut de Recherche pour le Développement, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Institut Agro Montpellier – France

Les sols des Hautes Terres de Madagascar sont principalement des Ferralsols. Leur valorisation en agriculture rencontre de multiples contraintes, principalement liées à la faible fertilité inhérente de ces sols et au mode de gestion, peu intensif, des exploitants. Ces sols sont multi-carencés, pauvres en matières organiques et en nutriments disponibles, et présentent un pH acide et un risque de toxicité aluminique élevé. D'autre part, les exploitants n'ont pas accès aux engrais minéraux pour couvrir les besoins des cultures. Les ressources organiques (telles que les fumiers et les composts) sont donc leurs principales sources de fertilisants. Cependant, ces matières organiques ne peuvent pas être disponibles en quantité suffisante et sont de faible qualité, ne permettant pas d'accroître ni la productivité, ni la durabilité des agrosystèmes. Afin d'améliorer la croissance et la nutrition des cultures, une gestion de la fertilité des sols qui promeut des assemblages de matières fertilisantes organiques et/ou minérales semble une pratique prometteuse pour les agriculteurs, basée sur des effets combinés des fertilisants. Pour tester cette hypothèse, nous avons étudié l'effet de 132 combinaisons de 17 matières fertilisantes, organiques et minérales, sur la croissance et la nutrition du riz à l'aide d'une expérience en serre à Madagascar. Deux types de classification ont été utilisés pour évaluer les matières fertilisantes : la classification élémentaire et la classification fonctionnelle. La classification élémentaire regroupe les matières sur la base de leur composition élémentaire intrinsèque (teneur en carbone, azote, phosphore, potassium, ...), tandis que la classification fonctionnelle regroupe les matières sur la base de leur effet sur la croissance et la nutrition des plantes lorsqu'elles sont combinées dans le sol, sans tenir compte de leurs caractéristiques propres. Les résultats montrent que certaines matières étroitement regroupées par la classification élémentaire ont des effets différents sur la croissance et la nutrition

*Intervenant

des plantes lorsqu'elles sont en combinaison dans le sol. Par exemple, la poudre de corne de zébu apparaît comme une matière organique particulière (peu fertilisante) dans la classification élémentaire, mais comme une ressource clé dans la classification fonctionnelle en favorisant la croissance et la nutrition des plantes lorsqu'elle est combinée à d'autres fertilisants dans le sol. Sa composition élémentaire unique joue un rôle important dans les interactions positives avec d'autres ressources. Le concept de " motif d'assemblage " a été proposé dans cette étude comme stratégie de fertilisation des sols, en suggérant que la combinaison de groupes fonctionnels de matières détermine mieux leur effet fertilisant que leur composition élémentaire. Les ressources induisant des effets d'interaction positifs élevés devraient être combinées avec celles ayant une composition élémentaire intéressante afin d'optimiser la productivité des cultures.

Prédiction de la qualité sanitaire d'une zone de baignade en Seine grâce à la spectrométrie de fluorescence et la sonde Fluocopée®

Antoine Raoult *¹, Angélique Goffin¹, Carlyne Lacroix², Sabrina Guerin-Rechdaoui², Vincent Rocher², Julien Sade¹, Gilles Varrault¹

¹ Laboratoire eau environnement et systèmes urbains (LEESU) – Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne -UPEC, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (UPEC) – France

² Direction de l'Innovation – SIAAP, F-92700 Colombes, France – France

Les deux dernières décennies ont vu s'intensifier le développement de nouveaux appareils de métrologie à haute fréquence pour suivre les paramètres biophysicochimiques des eaux de surface. Les sondes optiques, en particulier les sondes de fluorescence, occupent une place prépondérante dans cette démarche d'intégration de la mesure haute fréquence aux suivis environnementaux. De nombreuses corrélations et modèles prédictifs peuvent être établis entre les propriétés optiques et chimiques du milieu d'étude (Carstea et al., 2016, 2020; Goffin et al., 2018, 2019; Saraceno et al., 2009; Sorensen et al., 2021).

Le développement de la sonde Fluocopée® au LEESU en collaboration avec le SIAAP s'inscrit dans cette dynamique. Elle permet de suivre *in situ* et à haute fréquence l'évolution temporelle de 32 fluorophores pour caractériser la matière organique contre 2 à 3 fluorophores pour les autres sondes de fluorescence disponibles dans le commerce. Elle est déjà déployée en Seine sur plusieurs stations de mesures entre l'amont et l'aval de l'agglomération parisienne et en amont du traitement biologique de la station d'épuration Seine Aval opérée par le SIAAP.

Le grand nombre de fluorophores suivis par cette sonde permet d'envisager de nombreuses applications en lien avec le suivi de la qualité de l'eau. Une d'entre elles réside dans la prédiction des concentrations en Bactéries Indicatrices Fécales (BIF) à partir des caractéristiques de fluorescence des eaux de surface. À la fin de l'été 2023, une campagne de prélèvements et d'analyses a été mise en place avec l'appui des équipes du SIAAP et de la mairie de Paris sur le bassin qui accueillera les épreuves de triathlon et de nage en eau libre aux JO de Paris 2024. Cent trente-cinq échantillons d'eau de Seine ont été collectés au niveau du pont de l'Alma à Paris. Cette Campagne avait pour but de confronter les analyses bactériologiques des concentrations en *E. coli* réalisées avec une méthode microbiologique normée (NF EN ISO 9308-3) aux mesures de fluorescence obtenues pour les 32 fluorophores mesurés par la sonde Fluocopée®. Les données de fluorescence ainsi acquises ont été utilisées comme variables explicatives pour construire des modèles capables de prédire les concentrations en *E. coli* d'une zone de baignade.

Les principaux indicateurs provenant de la sonde Fluocopée® qui ont été mis en évidence se sont révélés sensiblement plus performants que ceux que permettent de suivre les sondes de fluorescence disponibles à l'heure actuelle sur le marché. Les modèles les plus performants ont

*Intervenant

toutefois été construits à partir de l'ensemble des fluorophores mesurés par la sonde Fluocopée® en employant notamment des algorithmes de Machin Learning ($R^2=0,745$). Le résidu médian (médiane des écarts entre les valeurs prédites et mesurées avec les méthodes de référence) pour les échantillons de validation du modèle (non utilisés pour la calibration) est égal à 24%. Cette valeur est comparable aux incertitudes de la méthode d'analyse microbiologique normée employée ici.

Cette méthodologie pourra être reproduite par la suite pour calibrer des modèles adaptés à la surveillance *in situ* à haute fréquence et en temps réel de la qualité microbiologique des nouveaux sites de baignade, notamment ceux prévus en Seine comme héritage des JO de Paris 2024.