



HAL
open science

**Vers une meilleure compréhension des processus
biogéochimiques au sein du système sol-plante : la clé
pour le développement d'agroécosystèmes
multifonctionnels et durables**

David Houben

► **To cite this version:**

David Houben. Vers une meilleure compréhension des processus biogéochimiques au sein du système sol-plante : la clé pour le développement d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables. Science des sols. Université Picardie Jules Verne, 2024. tel-04607835

HAL Id: tel-04607835

<https://hal.science/tel-04607835v1>

Submitted on 11 Jun 2024

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

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



MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

**Vers une meilleure compréhension des processus biogéochimiques au sein du système sol-plante :
la clé pour le développement d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables**

David HOUBEN

Soutenu le 23 avril 2024, devant le jury composé de

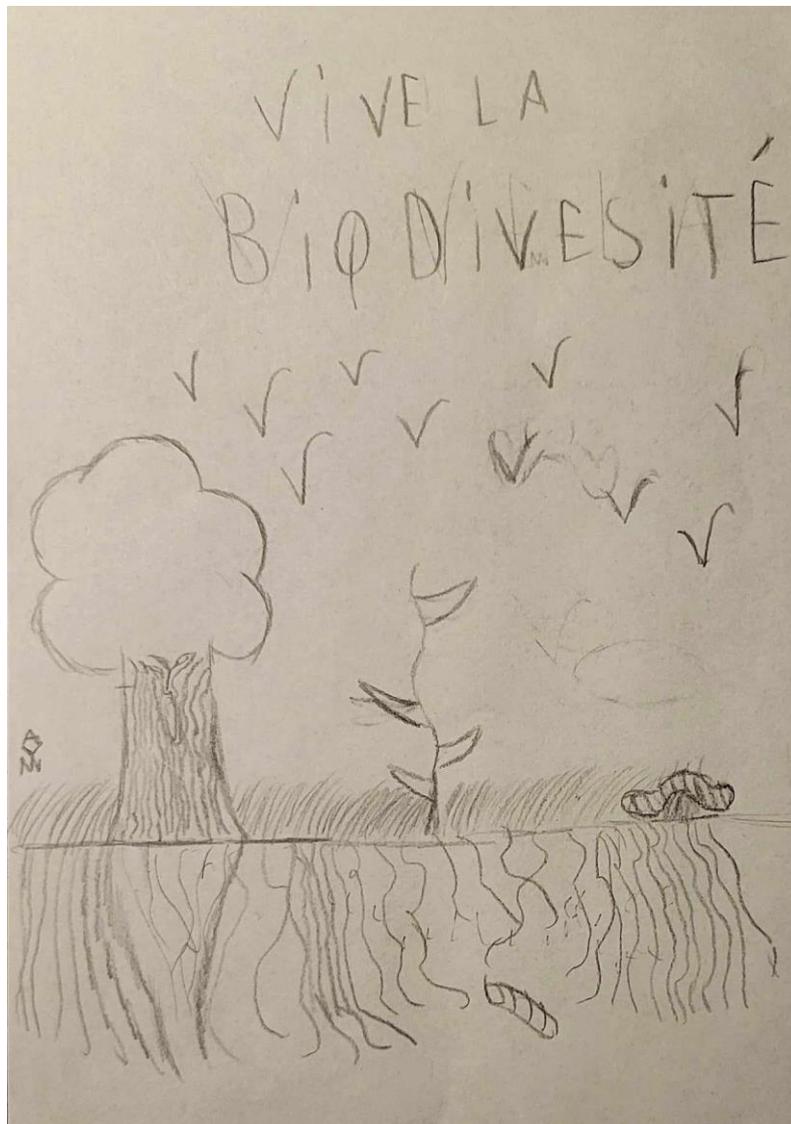
Sylvain Pellerin, Directeur de Recherche, INRAE Bordeaux

Claire Chenu, Professeure, AgroParisTech

Philippe Hinsinger, Directeur de Recherche, INRAE Montpellier

Jérôme Duclercq, Maître de Conférences, Université de Picardie Jules Verne

Michel-Pierre Faucon, Directeur à la Recherche, UniLaSalle Beauvais



*A mes enfants, parents et grands-parents
Et toujours à ceux qui gardent leur pessimisme pour des jours meilleurs*

Remerciements

Ouh yeah ! Ladies and Gentlemen, Science and Rock'n Roll !

Quel concert mes amis ! Mais les riffs endiablés n'auront pas eu raison de moi ! Il me reste encore un soupçon d'énergie pour diffuser avec force dans les amplis mes plus chaleureusement remerciements !

Alors, à vous, membres du jury, je vous adresse un tonitruant merci pour avoir accepté mon invitation avec enthousiasme. Je suis certain que votre expertise et vos regards croisés nourriront de riches et bouillonnants échanges.

A toi, Michel-Pierre, merci pour ton intarissable générosité, ton positivisme rayonnant, ton inébranlable sens du collectif et ta compagnie stimulante. Au cœur des méandres de la vie, certaines rencontres se révèlent déterminantes. La tienne en fait incontestablement partie. Merci de m'avoir tendu la main dès mon arrivée à Beauvais. Merci de m'avoir fait découvrir les mystères des traits fonctionnels des végétaux. Merci d'avoir considéré, sur nombre de sujets, mon profil comme complémentaire au tien : toi la plante, moi le sol, en voilà une belle interaction !

Si cette aventure de rédaction d'HDR, ponctuée d'incertitudes et de doutes, m'a confirmé que la procrastination est à la fois un art et une malédiction, elle m'a surtout rappelé que, bien que j'en sois le principal protagoniste, je ne devais mon salut qu'aux autres. Dans ce vaste firmament de la recherche collaborative, je souhaite aujourd'hui rendre hommage aux étoiles complices qui m'ont tantôt guidé, tantôt éclairé. Je ne saurais tous vous citer tant la constellation de vos diverses contributions est étendue. Alors, à vous toutes et tous avec qui, de près ou de loin, j'ai eu le plaisir d'échanger, de collaborer et de rêver tout au long de cette épopée scientifique, j'adresse mes plus vifs remerciements. Merci spécial aux étudiants, aux doctorants et aux postdoctorants que j'ai eu la chance d'encadrer. Pléthore de résultats présentés dans ce mémoire sont le fruit de vos efforts.

Je voudrais également remercier mon institution, UniLaSalle, et mon unité de recherche, AGHYLE, pour m'avoir offert un cadre de travail épanouissant depuis bientôt onze ans. Je souhaiterais mettre à l'honneur la bienveillance de Valérie Leroux et le soutien de la direction de mon unité de recherche, représentée dans un premier temps par Olivier Pourret puis par Stéphane Firmin et Isabelle Gattin. J'adresse une spéciale dédicace à Anne Combaud pour l'effervescent duo que nous formons mais également pour l'indulgence et la patience dont elle fait preuve lorsqu'il s'agit de m'expliquer des dossiers d'une complexité qui me paraît souvent abyssale. Je dis un énorme merci à Floriane Laverat qui rend bien souvent possible l'impossible. Je remercie aussi l'équipe SAgE, ses membres et leur bonne humeur qui en font un lieu de villégiature au sein du Collège Agrosociences ma foi fort plaisant. J'aimerais enfin remercier l'ensemble des collègues du Collège Agrosociences qui, à travers la confiance qu'ils m'accordent depuis que j'en ai pris la direction, garantissent ma dose de vitamines quotidienne.

A mes proches, mes amis et ma famille, la plupart du temps étrangers, perplexes ou dubitatifs face à mes pérégrinations scientifiques (et c'est sans doute très bien comme ça !), merci pour votre patience, votre indéfectible soutien et les nombreuses bouffées d'air frais que vous m'offrez pour respirer et profiter des vastes plaisirs de la vie.

A ma jolie chouette qui met de la poésie dans mes yeux, merci de transformer chaque instant en vers inoubliables.

Et enfin, merci à Yann et Baptiste, les notes douces et précieuses qui composent la mélodie de ma vie.

Table des matières

1.	Curriculum vitae	6
2.	Activités de recherche et d'enseignement et engagements institutionnels et envers la société ..	7
2.1.	Résumé de mon parcours professionnel	7
2.2.	Publications.....	11
2.2.1.	Liste des publications dans des revues internationales avec évaluation par les pairs	11
2.2.2.	Liste des publications dans des revues nationales avec évaluation par les pairs	14
2.2.3.	Liste des articles et chapitres de vulgarisation	14
2.2.4.	Liste des communications orales en tant qu'invité.....	15
2.2.5.	Liste des communications orales	15
2.3.	Liste des projets	17
2.3.1.	Projets de recherche et de prestation en tant que (co-)leader	17
2.3.2.	Projets de recherche et de prestation en tant que collaborateur	18
2.4.	Activités d'encadrement	19
2.4.1.	Co-direction de doctorant	19
2.4.2.	Encadrement ou co-encadrement de postdoc	19
2.4.3.	Encadrement d'étudiant en Master	19
2.5.	Rôle d'éditeur, de relecteur, et d'évaluateur	20
2.6.	Activités d'enseignement.....	21
3.	Bilan de mes activités de recherche	22
3.1.	Les interactions sol-plante au cœur de la régulation de la disponibilité des éléments : des métaux au phosphore	24
3.1.1.	Introduction.....	24
3.1.2.	Mobilisation et immobilisation des métaux au sein du système sol-plante : impact de l'activité racinaire	25
3.1.3.	Compréhension et valorisation des interactions sol-plante pour améliorer la disponibilité du phosphore	31
3.1.4.	L'identification des traits et des stratégies d'acquisition du phosphore au service de l'agroécologie : l'exemple des couverts intermédiaires.....	38
3.1.5.	L'identification des traits et des stratégies d'acquisition du phosphore : une solution pour optimiser la fertilisation des systèmes de cultures	42
3.2.	Utilisation d'amendements innovants issus de co-produits industriels ou agricoles.....	44
3.2.1.	Contexte	44
3.2.2.	Qu'est-ce que le biochar ?.....	45
3.2.3.	Les origines du biochar.....	46
3.2.4.	Utilisation du biochar dans les sols contaminés	48
3.2.5.	Utilisation du biochar en agriculture.....	48

3.3. Réflexions sur mon bilan	58
4. Projet de recherche	60
Vers une meilleure compréhension des processus biogéochimiques au sein du système sol-plante : la clé pour le développement d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables.....	60
4.1. Contexte.....	60
4.2. Optimisation de la gestion des amendements renouvelables : prise en compte des feedbacks, des effets directs et indirects et du temps.....	62
4.3. Effet du travail du sol sur les interactions sol-plante : une question de stratification et d'accessibilité ?.....	65
4.4. Valoriser les interactions sol-plante dans les systèmes diversifiés en espèces végétales : application aux couverts intermédiaires.....	68
4.5. Coupler les cycles à travers leurs liens directs et indirects : l'exemple des carboxylates et de leurs effets cascade	72
4.6. Bilan et mise en perspective de mon projet de recherche	74
5. Références.....	76
Résumé.....	85

1. Curriculum vitae

DAVID HOUBEN – CURRICULUM VITAE

Directeur du Collège Agrosociences

Enseignant-chercheur en Science du Sol

UniLaSalle

AGHYLE (Agroécologie, hydrogéochimie, milieux et ressources)

Rue Pierre Waguet 19, 60 000 Beauvais, France

david.houben@unilasalle.fr



Informations générales

Date de naissance : 13 mai 1984, Chimay, Belgique

Belge, deux enfants

Formation et Diplômes

2013 Docteur en Sciences agronomiques et ingénierie biologique, UCLouvain, Belgique
Titre de la thèse: *Heavy metal mobility in contaminated soils as affected by plants, amendments and biochar: implications for phytostabilization*
Directeur de thèse: Prof. Philippe Sonnet

2007 Bio-ingénieur : sciences et technologie de l'environnement, UCLouvain, Belgique

Expérience professionnelle

09/2021 – présent	Directeur du Collège Agrosociences, UniLaSalle (France)
10/2018 – 08/2021	Responsable de l'équipe des Sciences Agro-environnementales, Collège Agrosociences, UniLaSalle (France)
08/2013 – présent	Enseignant-chercheur en Science du Sol, UniLaSalle (France)
12/2012 – 08/2013	Attaché à la Direction de l'assainissement des sols, Service Public de Wallonie (Belgique)
01/2009 – 01/2013	Doctorant (bourse FRIA – FNRS), Unité des Sciences du Sol, Earth & Life Institute, UCLouvain (Belgique)
02/2008 – 12/2008	Assistant de recherche, Unité des Sciences du Sol, UCLouvain (Belgique)
10/2007 – 12/2007	Assistant de recherche, Unité des Sciences du Sol, UCLouvain (Belgique)

Section CNU de rattachement pour passer l'Habilitation à Diriger des Recherches

Section CNU 68 : « Biologie des Organismes »

2. Activités de recherche et d'enseignement et engagements institutionnels et envers la société

2.1. Résumé de mon parcours professionnel

Passionné par le fonctionnement des sols et soucieux de pouvoir contribuer à l'amélioration de leur multifonctionnalité, j'ai, après l'acquisition de mon diplôme de Bio-ingénieur, réalisé une thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique (2009-2013) à l'Université catholique de Louvain (Belgique), au sein du groupe de vie SOLS, Earth and Life Institute (ELI), pôle Environmental Sciences (ELI-e), sous la supervision du Prof. Philippe Sonnet. Mes travaux de thèse ont permis d'améliorer la compréhension de l'influence des processus pédologiques et biogéochimiques sur la mobilité des éléments traces (Zn, Cd, Pb, etc.) dans les sols. Soucieux de développer une approche pluridisciplinaire et multi-échelles, je me suis penché sur les réactions physico-chimiques impliquant les constituants du sol ainsi que sur les cycles biogéochimiques au sein des écosystèmes terrestres, en passant de l'analyse de la réactivité d'une phase minérale simple soumise à l'activité racinaire à l'estimation des rendements culturaux et des transferts sol-biomasse des éléments. Ces travaux ont donné lieu à la publication de sept articles dans des revues scientifiques internationales.

A l'issue de ma thèse, j'ai eu l'opportunité de travailler durant neuf mois en tant qu'attaché à la Direction de la protection des sols/Direction de l'assainissement des sols du Service public de Wallonie (Belgique). Cette fonction m'a permis d'appréhender les besoins et enjeux de la gestion des sols par les secteurs publics et privés et d'acquérir des notions de législation indispensables à la contextualisation de mes recherches et cours dans le cadre réglementaire.

Depuis août 2013, je bénéficie d'un poste d'enseignant-chercheur à UniLaSalle (Beauvais, France) où j'enseigne avec énormément d'enthousiasme et de passion les matières relatives à la science du sol (pédologie, introduction aux grands sols du monde, gestion des sols dans les agroécosystèmes, génie pédologique) et à la biogéochimie environnementale (cycles et transfert de l'azote, du phosphore, des métaux et des pesticides du sol vers les milieux aquatiques) à de futurs ingénieurs agronomes. De 2013 à 2021 (année à laquelle j'ai pris la fonction de Directeur de Collège, voir infra), ma charge de cours comprenait 94 h de cours magistraux et 70 h de travaux dirigés (y compris les séances dédiées à l'encadrement de projet) et 50 heures de travaux pratiques et de sortie de terrain, soit un total de 265 h équivalent TD (voir paragraphe 2.5 « Activités d'enseignement »). Les cours que je dispense sont essentiellement destinés aux étudiants du parcours « Agroécologie, Sols, Eaux et Territoires » du cycle ingénieur en Agronomie et Agro-Industries. Je participe également à l'encadrement de « projets étudiants » portant pour la plupart sur la mise en application de principes agroécologiques au sein d'agroécosystèmes contrastés. Ces projets adoptent une approche scientifique générant, dans la mesure du possible, des résultats valorisables sous forme de communication scientifique (article, poster, ...). Soucieux de stimuler l'intérêt des étudiants pour les sols, leur diversité et leur protection, j'ai, au sein de la formation en Agronomie et Agro-Industries, initié la création d'un module d'approfondissement à destination des étudiants de licence 2 sur les grands sols du monde, un module abordant le génie pédologique et la gestion des sols dégradés pour les étudiants de 2^{ème} année ingénieur ainsi qu'un module abordant les principes de gestion des sols dans différents environnements (agricoles, pollués, ...) en licence 3. Plus récemment, j'ai créé un module destiné à initier les étudiants de licence 1 de la formation en Géosciences et Environnement à

la pédologie. Dans mon enseignement, je tâche de mettre en œuvre et de développer des approches pédagogiques qui reposent sur l’interactivité et la diversité des modalités d’apprentissage. Au-delà de mes activités d’enseignement, je me suis également impliqué activement dans le programme de formation des étudiants, notamment en intégrant les commissions en charge de mettre en place diverses réformes pédagogiques aux niveaux licences et ingénieur.

Considérant que recherche et enseignement sont indissociables et compte tenu de ma forte implication dans la spécialisation « Agroécologie, Sols, Eaux et Territoires », j’ai, depuis mon arrivée à UniLaSalle, considérablement élargi mon champ de recherches, notamment en intégrant des thématiques spécifiques aux agroécosystèmes telles que le développement de systèmes et pratiques de culture multi-performants sur base de principes agroécologiques. Par exemple, j’ai co-dirigé une thèse (arrêtée par le candidat après deux ans) portant sur l’impact de l’application de boues de station d’épuration sur la disponibilité du phosphore dans les sols et le fonctionnement des agrosystèmes. J’ai également co-dirigé une thèse (Nicolas Honvault, 2017 – 2020) visant à étudier l’impact des cultures intermédiaires sur la disponibilité du phosphore dans les sols cultivés du nord-est de la France. Enfin, j’ai co-dirigé une autre thèse (Issifou Amadou, 2019 - 2022) ambitionnant d’élucider l’effet des formes de phosphore sur la disponibilité de cet élément au sein du système sol-plante. En parallèle des encadrements de doctorants, j’ai également supervisé ou co-supervisé quatre post-doctorants dont les travaux portaient sur l’évaluation de l’effet du biochar sur le fonctionnement des systèmes sol-plante (cfr infra). J’ai par ailleurs obtenu des financements auprès de différents organismes, tant publics que privés, pour mener à bien mes activités de recherches et je me suis impliqué dans plusieurs projets de recherche à l’échelle nationale (e.g. projet FUI Biochar, Soja Made in Normandie, RESIAR, Ad’méthas, Rapetorr) et internationale (e.g. Cost Action Biochar, Three-C-Interreg). Je totalise actuellement 49 articles scientifiques, dont certains ont été publiés dans des revues prestigieuses (ex : Trends in Plant Science, Scientific Reports, Advances in Agronomy, Environmental Science & Technology), 3411 citations et mon h-index est de 25 (selon Google Scholar). Le graphe qui suit (Figure A) illustre l’évolution des citations de mes articles en fonction du temps.

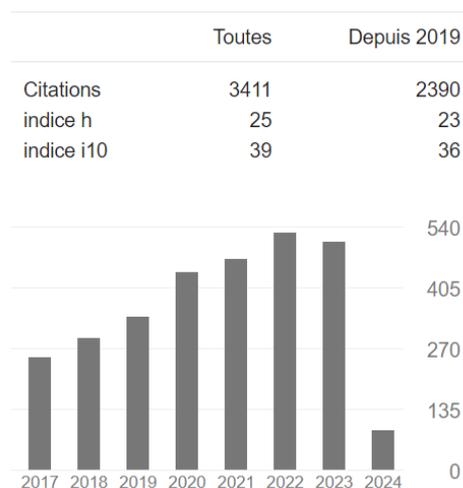


Figure A. Données bibliométriques (source : Google Scholar, le 09 février 2024)

Mes activités de recherche et d’enseignement m’ont amené à travailler et échanger avec plusieurs acteurs du monde agricole. Je citerais notamment l’Association pour la Promotion d’une Agriculture Durable, la Chambre d’agriculture de l’Oise (impact des systèmes et pratiques de culture

sur la biodiversité des sols et la dynamique des éléments nutritifs), le groupe coopératif agri-industriel Vivescia (impact de la gestion des résidus de culture sur le recyclage des éléments nutritifs), VTGreen, ETIA, Avril (effet du biochar sur la fertilité des sols), Ynsect, Innovafeed (effet du frass sur la fertilité des sols) et SEDE Environnement (estimation du potentiel fertilisant phosphaté de différentes boues d'épuration). En partenariat avec le pôle de compétitivité Industrie et Agro-Ressources, j'ai également participé à la création de plateformes d'expérimentations agronomiques destinées à explorer les possibilités de développement de systèmes à forte production de biomasse pour répondre aux filières agroindustrielles du nord de la France. Ces rencontres et collaborations m'ont permis d'identifier certains verrous et leviers scientifiques, techniques, sociaux, économiques et politiques qui peuvent promouvoir ou empêcher le développement de systèmes de culture innovants basés sur une intensification écologique de l'agriculture.

Je ne conçois pas la recherche, fondamentale et appliquée, sans transfert de connaissances et de technologies vers la société. La recherche doit se positionner en synergie avec les attentes de la formation et celles de la société. L'établissement d'enseignement supérieur et de la recherche doit ainsi jouer un rôle moteur dans le développement des territoires auxquels il est associé. Dans cette optique, mais aussi par ma volonté de faire découvrir tant aux acteurs du monde agricole qu'au grand public, enfants et adultes, les multiples services que rendent les sols, j'ai participé à la création de plusieurs activités de vulgarisation dont les plus importantes sont l'organisation d'un cycle de quatre conférences grand public en 2015 à l'occasion de l'année internationale des sols, l'encadrement de classes de CM 2 (9 – 11 ans) durant la semaine de la Fête de la Science organisée par l'agglomération du Beauvaisis pour amener les élèves à saisir la nécessité de préserver les sols par l'intermédiaire d'activités visant à manipuler le sol et ses propriétés, la participation à l'émission E=M6 pour expliquer des phénomènes extraordinaires opérant dans le sol ou encore la réalisation de vidéos abordant la valorisation de la biodiversité végétale pour gérer durablement la fertilité des sols.

Entre octobre 2018 et aout 2021, j'ai été nommé à la tête de l'équipe des Sciences Agro-environnementales au sein du Collège Agrosiences d'UniLaSalle. Cette fonction m'a amené à superviser et coordonner une équipe constituée de sept enseignants-chercheurs et deux ingénieurs d'étude en veillant principalement à 1) stimuler l'animation des thématiques gravitant autour des sciences agro-environnementales tout en favorisant la transversalité vis-à-vis des autres disciplines, 2) renforcer les synergies recherche-enseignement, l'un alimentant l'autre et réciproquement 3) proposer une formation cohérente en matière d'offre et de besoin des métiers de l'Ingénieur. Cette fonction ma permis de diversifier mes missions académiques tout en consolidant mon expérience en matière de gestion des ressources humaines.

Enfin, en septembre 2021, je suis devenu Directeur du Collège Agrosiences d'UniLaSalle. Au sein du collège, je gère une quarantaine de personnes, principalement des enseignants-chercheurs, réparties en quatre équipes gravitant autour de la thématique des agrosiences (i. Sciences agronomiques, ii. Sciences animales, iii. Sciences agro-environnementales, iv. Agrotechnologie et Société). Ce poste me permet de mettre en application mes compétences au service de la stratégie de développement et de positionnement du Collège et de l'Institut. En particulier, mes missions consistent à (i) asseoir le positionnement du Collège dans l'univers des Agrosiences, tant du point de vue de la formation que du point de vue de l'attractivité pour les entreprises (partenariat et recrutement des étudiants), (ii) favoriser les synergies recherche-enseignement dans le domaine des Agrosiences, (iii) prospecter et identifier les possibilités de développement d'études, voire de chaires, en collégialité avec les unités de recherche, (iv) consolider les liens intra- et intersites UniLaSalle et (v)

contribuer à assurer l'équilibre budgétaire mais aussi la stabilité, l'épanouissement et l'émancipation intellectuelle et professionnelle de chacun des membres.

La figure B résume mon parcours actuel.

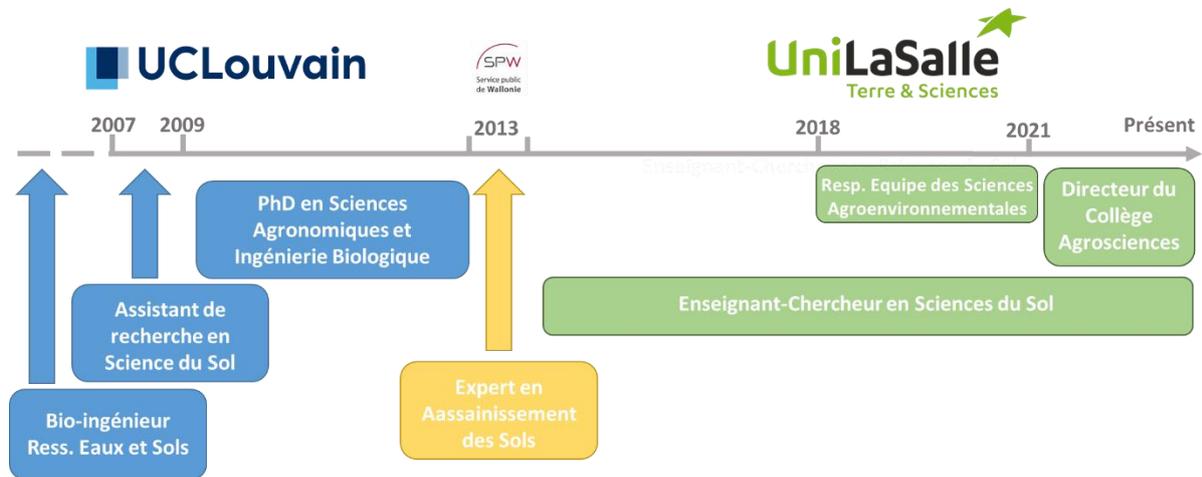


Figure B. Parcours professionnel

La suite de cette section détaille mes publications, la liste des projets que j'ai portés ou auxquels j'ai contribué, mes activités d'encadrement ainsi que mes activités d'enseignement.

2.2. Publications

2.2.1. Liste des publications dans des revues internationales avec évaluation par les pairs (les publications précédées d'un astérisque « * » sont issues du travail de thèse des doctorants)

1. *Honvault, N., Faucon, M.-P., McLaren, T., **Houben, D.**, Frossard, E., Oberson, A. 2024. Influence of cover crop residue traits on phosphorus availability and subsequent uptake by plants. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, in press. IF (2022) : 3.1 ; 5year-IF : 3.7
2. Lebrun, M., Védère, C., Honvault, N., Rumpel, C., **Houben, D.** 2023. Mixing ratio and Nitrogen fertilization drive synergistic effects between biochar and compost. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, in press. IF (2022) : 3.1 ; 5year-IF : 3.7
3. Faucon, M.-P., Aussenac, T., Debref, R., Firmin, S., **Houben, D.**, Marraccini, E., Sauvé, L., Trinsoutrot-Gattin, I., Gloaguen, R. 2023. Combining agroecology and bioeconomy to meet the societal challenges of agriculture. *Plant and Soil*, in press. IF (2021) : 4.993 ; 5year-IF : 5.440
4. Dulaurent, A. M., **Houben, D.**, Honvault, N., Faucon, M. P., Chauvat, M. 2023. Beneficial effects of conservation agriculture on earthworm and Collembola communities in Northern France. *Plant and Soil*, 1-11. IF (2021) : 4.993 ; 5year-IF : 5.440
5. Honvault, N., **Houben, D.**, Lebrun, M., Vedere, C., Nobile, C., Guidet, J., Kervroëdan, L., Aubertin, M. L., Rumpel, C., Faucon, M. P., Dulaurent, A. M. 2023. Positive or neutral effects of biochar-compost mixtures on earthworm communities in a temperate cropping system. *Applied Soil Ecology*, 182, 104684. IF (2021): 5.509 ; 5year-IF: 5.678
6. Védère, C., Lebrun, M., Biron, P., Planchais, S., Bordenave-Jacquemin, M., Honvault, N., Firmin, S., Savouré, A., **Houben, D.**, Rumpel, C. 2023. The older, the better: Ageing improves the efficiency of biochar-compost mixture to alleviate drought stress in plant and soil. *Science of the Total Environment*, 856, 158920. IF (2021): 10.754 ; 5year-IF: 10.237
7. *Amadou, I., Faucon, M. P., **Houben, D.** 2022. Role of soil minerals on organic phosphorus availability and phosphorus uptake by plants. *Geoderma*, 428, 116125. IF (2021): 7.422 ; 5year-IF: 7.444
8. Nobile, C., Lebrun, M., Védère, C., Honvault, N., Aubertin, M. L., Faucon, M. P., Girardin, C., Houtot, S., Kervroëdan, L., Dumaurent, A. M., Rumpel, C., **Houben, D.** 2022. Biochar and compost addition increases soil organic carbon content and substitutes P and K fertilizer in three French cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(6), 1-15. IF (2021): 7.832 ; 5year-IF: 10.983
9. Honvault, N., Nobile, C., Faucon, M.-P., Firmin, S., **Houben, D.** 2022. Direct and indirect interactions between biochar properties, plant belowground traits and plant performance. *GCB Bioenergy*, 14, 1254-1265. IF (2021): 5.957 ; 5year-IF: 6.293
10. Védère, C., Lebrun, M., Honvault, N., Aubertin, M. L., Girardin, C., Garnier, P., Dignac, M. F., **Houben, D.**, Rumpel, C. 2022. How does soil water status influence the fate of soil organic matter? A review of processes across scales. *Earth-Science Reviews*, 104214. IF (2021): 12.038 ; 5year-IF: 14.424
11. Kervroëdan, L., **Houben, D.**, Guidet, J., Dulaurent, A.-M., Marraccini, E., Deligey, A., Journal, C., Lamerre, J., Faucon, M.-P. 2022. Agri-environmental assessment of conventional and alternative bioenergy cropping systems promoting biomass productivity. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 9, 284-294. IF (2021): n.a. ; 5year-IF: n.a.
12. Watson, C., **Houben, D.**, Wichern, F. 2022. Frass: The Legacy of Larvae—Benefits and Risks of Residues From Insect Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6, 889004. IF (2021): 5.005; 5year-IF: 5.490

13. *Amadou, I., Faucon, M.-P., **Houben, D.** 2022. New insights into sorption and desorption of organic phosphorus on goethite, gibbsite, kaolinite and montmorillonite. *Applied Geochemistry* 143, 105378. IF (2021): 3.841 ; 5year-IF: 4.045
14. Denier, J., Faucon, M.-P., Dulaurent, A.-M., Guidet, J., Kervroëdan, L., Lamerre, J., **Houben, D.** 2022. Earthworm communities and microbial metabolic activity and diversity under conventional, feed and biogas cropping systems as affected by tillage practices. *Applied Soil Ecology* 169, 104232. IF (2021): 5.509 ; 5year-IF: 5.678
15. *Amadou, I., **Houben, D.**, Faucon, M.-P. 2021. Unravelling the Role of Rhizosphere Microbiome and Root Traits in Organic Phosphorus Mobilization for Sustainable Phosphorus Fertilization. A Review. *Agronomy* 11, 2267. IF (2021): 3.949; 5year-IF: 4.117
16. *Honvault, N., **Houben, D.**, Firmin, S., Megloulou, H., Laruelle, F., Fontaine, J., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Coutu, A., Lambers, H., Faucon, M. 2021. Interactions between below-ground traits and rhizosheath fungal and bacterial communities for phosphorus acquisition. *Functional Ecology* 35, 1603–1619. IF (2021): 6.282 ; 5year-IF: 6.607
17. **Houben, D.**, Daoulas, G., Dulaurent, A.-M. 2021. Assessment of the short-term fertilizer potential of mealworm frass using a pot experiment. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5, 714596. IF (2021): 5.005 ; 5year-IF: 5.490
18. Aubertin, M.-L., Girardin, C., Houot, S., Nobile, C., **Houben, D.**, Bena, S., Brech, Y.L., Rumpel, C. 2021. Biochar-compost interactions as affected by weathering: Effects on biological stability and plant growth. *Agronomy*, 11, 336. IF (2021): 3.949; 5year-IF: 4.117
19. Bashir, S., Hussain, Q., Zhu, J., Fu, Q., **Houben, D.**, Hu, H. 2020. Efficiency of KOH modified rice straw derived biochar on cadmium mobility, bioaccessibility and bioavailability risk index in red soil. *Pedosphere*, 30 (6), 874-882. IF (2021): 5.514 ; 5year-IF: 6.039
20. Dulaurent, A.-M., Daoulas, G., Faucon, M.-P., **Houben, D.** 2020. Earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) mediate the fertilizing effect of frass. *Agronomy*, 10, 783. IF (2021): 3.949; 5year-IF: 4.117
21. *Honvault, N., **Houben, D.**, Nobile, C., Firmin, S., Lambers, H., Faucon, M.-P. 2020. Tradeoffs among phosphorus-acquisition root traits of crop species for agroecological intensification. *Plant and Soil*, 461, 137-150. IF (2021): 4.993 ; 5year-IF: 5.440
22. **Houben, D.**, Sonnet, P. 2020. Metal immobilization and nitrate reduction in a contaminated soil amended with zero-valent iron (Fe⁰). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 201, 110868. IF (2021): 7.129 ; 5year-IF: 7.284
23. Gómez-Suárez, A.D., Nobile, C., Faucon, M.-P., Pourret, O., **Houben, D.** 2020. Fertilizer potential of struvite as affected by nitrogen form in the rhizosphere. *Sustainability*, 12, 2212. IF (2021): 3.889 ; 5year-IF: 4.089
24. **Houben, D.**, Daoulas, G., Faucon, M.-P., Dulaurent, A.-M. 2020. Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties. *Scientific Reports*, 10, 4659. IF (2021): 4.996 ; 5year-IF: 5.516
25. Yacoumas, A., Honvault, N., **Houben, D.**, Fontaine, J., Megloulou, H., Laruelle, F., Tisserant, B., Faucon, M.-P., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Firmin, S. 2020. Contrasting response of nutrient acquisition traits in wheat grown on bisphenol A contaminated soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 231, 23. IF (2021): 2.984 ; 5year-IF: 2.982
26. Nobile, C., Denier, J., **Houben, D.** 2020. Linking biochar properties to biomass of basil, lettuce and pansy cultivated in growing media. *Scientia Horticulturae*, 109001. IF (2021): 4.342 ; 5year-IF: 4.342

27. Nobile, C., **Houben, D.**, Michel, E., Firmin, S., Lambers, H., Kandeler, E., Faucon, M.P. 2019. Phosphorus-acquisition strategies of canola, wheat and barley in soil amended with sewage sludges. *Scientific Reports*, 9, 14878. IF (2021): 4.996 ; 5year-IF: 5.516
28. **Houben, D.**, Michel, E., Nobile, C., Lambers, H., Kandeler, E., Faucon., M.P. 2019. Response of phosphorus dynamics to sewage sludge application in an agroecosystem in northern France. *Applied Soil Ecology*, 137, 178-186. IF (2021): 5.509 ; 5year-IF: 5.678
29. **Houben, D.**, Faucon, M.P., Mercadal, A.M.M. 2018. Response of organic matter decomposition to no-tillage adoption evaluated by the Tea Bag technique. *Soil Systems*, 2(3), 42. IF (2021): n.a.; 5year-IF: n.a.
30. Li, Z., Delvaux, B., Yans, J., Dufour, N., **Houben, D.**, Cornélis, J.T. 2018. Phytolith-rich biochar increases cotton biomass and silicon-mineralomass in a highly weathered soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181, 537-546. IF (2021): 2.566 ; 5year-IF: 3.283
31. Pourret, O., **Houben, D.** 2018. Characterization of metal binding sites onto biochar using rare earth elements as a fingerprint. *Heliyon*, 4(2), e00543. IF (2021): 3.776 ; 5year-IF: 3.752
32. Opfergelt, S., Cornélis, J.T., **Houben, D.**, Givron, C., Burton, K.W., Mattielli, N. 2017. The influence of weathering and soil organic matter on Zn isotopes in soils. *Chemical Geology*, 466, 140-148. IF (2021): 4.685 ; 5year-IF: 4.942
33. Faucon, M.P., **Houben, D.**, Lambers, H. 2017. Plant functional traits: soil and ecosystem services. *Trends in Plant Science*. 22, 385-394. IF (2021): 22.012; 5year-IF: 23.116
34. **Houben, D.**, Hardy, B., Faucon, M.P., Cornélis, J.T. 2017. Effect of biochar on phosphorus bioavailability in an acidic silt loam soil. *BASE*, 21, 1-9. IF (2021): 0.889 ; 5year-IF: 1.838
35. Hardy, B., Cornélis, J.T., **Houben, D.**, Leifeld, J., Lambert, R., Dufey, J. 2017. Pre-industrial charcoal kiln sites in Wallonia (Belgium) to evaluate the long-term effect of biochar on temperate agricultural soil properties. *European Journal of Soil Science*, 68, 80-89. IF (2021): 4.178 ; 5year-IF: 4.883
36. Hardy, B., Cornélis, J.T., **Houben, D.**, Lambert, R., Dufey, J. 2016. The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonie, Belgium. *European Journal of Soil Science*, 67 (2), 206-216. IF (2021): 4.178 ; 5year-IF: 4.883
37. Couder, E., Mattielli, N., Drouet, T., Smolders, E., Delvaux, B., Iserentant, A., Meeus, C., Maerschalk, C., Opfergelt, S., **Houben, D.** 2016. Transpiration flow controls Zn transport in *Brassica napus* and *Lolium multiflorum* under toxic levels as evidenced from isotopic fractionation. *CR Geoscience*, 347(7), 386-396. IF (2021): 1.424 ; 5year-IF: 2.567
38. Faucon, M.P., **Houben, D.**, Reynoird, J.P., Mercadal-Dulaurent, A.M., Armand, R., Lambers, H. 2015. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Advances in Agronomy*, 134, 51-79. IF (2021): 9.265; 5year-IF: 9.756
39. **Houben, D.**, Sonnet, Ph. 2015. Impact of biochar and root-induced changes on metal dynamics in the rhizosphere of *Agrostis capillaris* and *Lupinus albus*. *Chemosphere*, 139, 644-651. IF (2021): 8.943; 5year-IF: 8.520
40. Pourret, O., Lange, B., **Houben, D.**, Colinet, G., Shutcha, M., Faucon, M.P. 2015. Modeling cobalt and copper speciation in metalliferous soils from Katanga (Democratic Republic of Congo): a tool in phytoremediation management. *Journal of Geochemical Exploration*, 149, 87-96. IF (2021): 4.166; 5year-IF: 4.579

41. **Houben, D.**, Sonnet, Ph., Tricot, G., Mattielli, N., Couder, E., Opfergelt, S. 2014. Impact of root-induced mobilization of zinc on stable Zn isotope variation in the soil-plant system. *Environmental Science & Technology*, 48(14), 7866-7873. IF (2021): 11.357; 5year-IF: 12.154
42. **Houben D.**, Sonnet, Ph., Cornélis, J.T. 2014. Biochar from *Miscanthus*: a potential silicon fertilizer. *Plant and Soil*, 374, 871-882. IF (2021): 4.993 ; 5year-IF: 5.440
43. **Houben, D.**, Evrard, L., Sonnet, Ph. 2013. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass and Bioenergy*, 57, 196-204. IF (2021): 5.774; 5year-IF: 5.500
44. **Houben, D.**, Evrard, L., Sonnet, Ph. 2013. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere*, 92, 1450-1457. IF (2021): 8.943; 5year-IF: 8.520
45. **Houben, D.**, Couder, E., Sonnet, Ph. 2013. Leachability of cadmium, lead and zinc in a long-term spontaneously revegetated slag heap: Implications for phytostabilization. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 543-554. IF (2021): 3.536; 5year-IF: 3.821
46. **Houben, D.**, Pircar, J., Sonnet, Ph. 2012. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 87-94. IF (2021): 4.166; 5year-IF: 4.579
47. **Houben, D.**, Sonnet, Ph. 2012. Zinc mineral weathering as affected by plant roots. *Applied Geochemistry*, 27, 1587 - 1592. IF (2021): 3.841 ; 5year-IF: 4.045
48. Lambrechts, T., Gustot, Q., Couder, E., **Houben, D.**, Iserentant, A., Lutts, S. 2011. Comparison of EDTA-enhanced phytoextraction and phytostabilisation strategies with *Lolium perenne* on a heavy metal contaminated soil. *Chemosphere*, 85, 1290-1298. IF (2021): 8.943; 5year-IF: 8.520
49. **Houben, D.**, Meunier, C., Pereira, B., Sonnet, Ph. 2011. Predicting the degree of phosphorus saturation using the ammonium acetate-EDTA soil test. *Soil use and management*, 27, 283-293. IF (2021): 3.672 ; 5year-IF: 3.314

2.2.2. Liste des publications dans des revues nationales avec évaluation par les pairs

1. Dulaurent, A.-M., **Houben, D.** 2020. Sensibiliser les jeunes au sol à l'aide de la démarche scientifique : retour d'expérience d'un atelier conduit dans le cadre de la Fête de la Science. *Etude et Gestion des Sols*, 27, 9-22. IF (2021): n.a. ; 5year-IF: n.a.
2. Faucon, M.-P., Michel, E., Lambers, H., **Houben, D.** 2016 Avancées et perspectives sur l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les systèmes de culture. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 6 (1), 77-85. IF (2021): n.a. ; 5year-IF: n.a.

2.2.3. Liste des articles et chapitres de vulgarisation

1. **Houben, D.** 2022. Le biochar : caractéristiques et applications agronomiques et environnementales. Chapitre du livre : « Charbon », édition : Terre vivante.
2. Faucon, M.-P., **Houben D.**, Veloso, M. 2022. Les secrets des racines et des sols, clefs de l'agroécologie. *The Conversation*
3. Faucon, M.-P., **Houben D.**, Trinsoutrot-Gattin, I., Honvault, N. 2022. Comment mieux recycler le phosphore présent dans les sols ? *The Conversation*

4. Pourret, D. **Houben, D.** 2018. How To Gain Insight Into Biochar Sorbing Behavior Using Rare Earth Elements. *Science Trends*
5. **Houben, D.** 2017. Pour cultiver mieux, faut-il vouloir cultiver... ailleurs ? In 150 idées pour la réussite de nos agriculteurs. Saf agr'iDées, Paris, France.

2.2.4. Liste des communications orales en tant qu'invité

1. **Houben, D.**, Honvault, N., Faucon, M.P, Rumpel, C., Lebrun, M., Védère, C., Dulaurent, A.M., Nobile., C. Impact of biochar – compost mixtures on soil properties and crop yield in French cropping systems. *Three-C: Continuous Professional Development Webinar, 17/02/2023.*
2. **Houben, D.** La formation des étudiants sur les enjeux liés à la dégradation des sols. *Journée mondiale des Sols, 08/12/2021*
3. **Houben, D.**, Sonnet, Ph., Couder, E., Mattielli, N., Opfergelt, S. Deciphering Zn mobility in the soil-plant system using stable Zn isotopes. *Symposium «Non-traditional stable isotopes in glacial and non-glacial environments», Louvain-la-Neuve, Belgium, 07/01/2019.*
4. **Houben, D.**, Ponthieu, M. Evaluation et gestion de la mobilité des éléments traces métalliques dans les sols agricoles. Journée « Les sols agricoles, mieux les connaître pour mieux les gérer », Reims, France, 23/05/2017.
5. **Houben, D.** Immobilization of heavy metals by biochar in contaminated soils: the role of pH. *Workshop on Biochar and Mining Soils, Nancy, France, 17/09/2015 – 18/09/2015.*
6. **Houben, D.**, Evrard, L., Rees, F., Sonnet, Ph. Utilisation du biochar pour remédier et valoriser les sols contaminés par les métaux. *1^{er} Atelier Sol, Les fonctions agro-écosystémiques des matières organiques du sol : état des lieux et recommandations en termes de gestion des sols, Peyrescq, France, 18/05/2015 – 22/05/2015.*
7. **Houben, D.** Effets bénéfiques de l'application de biochar sur la mobilité des métaux lourds et la production de biomasse énergétique : Implications pour la valorisation des sols contaminés. *11^{ème} Edition de la Journée de l'Environnement ADEME, Beauvais, France, 27/03/2014.*

2.2.5. Liste des communications orales

(l'orateur est souligné)

1. Amadou, I., Faucon, M.-P., **Houben, D.** Adsorption and desorption dynamics of organic phosphorus forms from Fe/Al oxyhydroxides and clay minerals. *22nd World Congress of Soil Science, Glasgow, Ecosse, 31/07/2022 – 05/08/2022.*
2. Védère, C., Lebrun, M., Honvault, N., Aubertin, M.-L., Girardin, C., Garnier, P., Dignac, M.-F., **Houben, D.**, Rumpel, C. How Does Soil Water Status Influence the Fate of Soil Organic Matter? A Review of Processes across Scales. *8th International Symposium on Soil Organic Matter, Séoul, Corée du Sud, 26/06/2022 – 30/06/2022.*
3. Védère, C., Lebrun, M., Biron, P., Planchais, S., Bordenave Jacquemin, M., Honvault, N., Firmin, S., Savouré, A., **Houben, D.**, Rumpel, C. Effect of Fresh and Aged Amendments on Alleviating Water-Stress Impacts on Plant Growth and Soil Microbial Functioning. *8th International Symposium on Soil Organic Matter, Séoul, Corée du Sud, 26/06/2022 – 30/06/2022.*

4. **Houben, D.**, Dulaurent, A.-M., Faucon, M.-P. Les co-produits organiques et leurs impacts sur la fertilité des sols et la fertilisation des cultures. *Journées Condorcet 2021*, Virtual Meeting, 01/07/2021 – 02/07/2021.
5. Aubertin, M.-L., **Houben, D.**, Girardin, C., Houot, S., Rumpel, C. Effet des mélanges biochar-compost sur les propriétés agronomiques du sol. *15^{ème} Journée d'étude des Sols*, Montpellier, France, 21/06/2021 – 25/06/2021
6. Honvault, N., **Houben, D.**, Oberson, A., McLaren, T., Frossard, E., Lambers H., Faucon M.-P. Trait based approach of phosphorus cycling to unravel multispecies systems functioning. *ESA2020*, Virtual meeting, 03/08/2020 – 06/08/2020.
7. Aubertin, M.-L., **Houben, D.**, Nobile, C., Houot, S., Girardin, C., Rumpel, C. Does compost and biochar interact on the stability of the mixture and does these interactions change after weathering? *EGU*, Virtual Meeting, 04/05/2020 – 08/05/2020.
8. Honvault N., **Houben D.**, Lambers H., Firmin S., Nobile C., Faucon M.-P. Highlighting phosphorus-acquisition strategies in intermediate crops, a functional approach. *IPW9*, Zurich, Switzerland, 08/07/2019 – 12/07/2019.
9. Yacoumas, A., Honvault, N., **Houben, D.**, Fontaine, J., Megloulou, H., Laruelle, F., Tisserant, B., Faucon, M.-P., Lounès-Hadj, Sahraoui A., Firmin S. Impact d'un polluant émergent, le bisphénol A, sur les traits fonctionnels impliqués dans l'acquisition des minéraux chez le blé. *Journées Condorcet*, Reims, France, 25/06/2019 – 27/06/2019.
10. Nobile, C., **Houben, D.**, Michel, E., Lambers, H., Kandeler, E., Faucon, M.-P. Impact des formes de phosphore (P) dans les boues de station d'épuration sur la disponibilité du P. *14^{ème} Journée d'étude des Sols*, Rouen, France, 09/07/2018 – 12/07/2018.
11. Mercadal, A.M., **Houben, D.**, Chauvat M., Faucon M.P. Effets de la quantité et des formes de phosphore et de dans les boues d'épuration urbaine sur la structure des communautés faunistiques du sol. *14^{ème} Journée d'étude des Sols*, Rouen, France, 09/07/2018 – 12/07/2018.
12. Mercadal A.M., **Houben D.**, Peaucellier F., Faucon M.-P. (2017) Soil chemical and biological properties under conventional systems and direct seeding mulch-based cropping systems. *AXEMA-SIMA*, Paris, France, 25/02/2017
13. Li, Z., Delvaux, B., Yans, J., Dufour, N., **Houben, D.**, Cornélis, J.-T., 2016b. Phytolith-rich biochar increases Si uptake of cotton plants in a highly weathered soil. *Thematic day SSSB*, Brussels, Belgium, 30/11/2016
14. Michel, E., **Houben, D.**, Lambers, H., Faucon, M.P. Effect of sewage sludge on agroecosystem functioning, with a focus on phosphorus speciation and dynamics in soil. *5th International EcoSummit*, Montpellier, France, 29/08/2016 – 01/09/2016.
15. Mercadal, A.M., **Houben, D.**, Chen, M., Faucon, M.P. Relationships between earthworm communities, agricultural practices and cropping systems at the farm level. *5th International EcoSummit*, Montpellier, France, 29/08/2016 – 01/09/2016.
16. **Houben, D.** Impact du biochar sur la mobilité des métaux dans le système sol-plante: le rôle du pH. *13^{ème} Journée d'étude des Sols*, Louvain-la-Neuve, Belgium, 05/07/2016 – 08/07/2016.
17. Li, Z., Delvaux, B., Yans, J., Dufour, N., **Houben, D.**, Cornélis, J.-T., 2016. Effect of soil weathering degree on the increase of cotton biomass and silicon mineralomass after amendment with biochar highly concentrated in phytoliths. *EGU*, Vienna, Austria, 17/04/2016 – 22/04/2016.
18. **Houben, D.**, Piricar, J. & Sonnet, Ph. Effects of cost-effective amendments on leaching, phytoavailability and fractionation of heavy metals in a contaminated soil. *EGU General Assembly 2011*, Vienna, Austria, 03/04/2011 - 08/04/2011.

19. Lambrechts, T., Gustot, Q., Couder, E., **Houben, D.**, Iserentant, A. & Lutts, S. Phytomanagement of heavy metals contaminated soils: mobilization or immobilization of pollutants? *The 6th International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas*, Marrakech, Morocco, 03/10/2011 - 07/10/2011.
20. **Houben, D.** & Sonnet, Ph. Leaching and phytoavailability of zinc and cadmium in a contaminated soil treated with zero-valent iron. *9th World Congress of Soil Science*, Brisbane, Australia, 01/08/2010 - 06/08/2010.
21. Couder, E., Mattielli, N., **Houben, D.**, Cambier, C. & Delvaux, B. Highlighting processes involved in mobility and bioavailability of zinc within contaminated substrates: multiple approaches. *9th World Congress of Soil Science*, Brisbane, Australia, 01/08/2010 - 06/08/2010.

2.3. Liste des projets

2.3.1. Projets de recherche et de prestation en tant que (co-)leader

- En cours* Développement d'une filière innovante d'amendement, de fertilisation et de stockage du carbone dans les sols à destination des agriculteurs : la paille de colza torréfiée (Rapetorr), *Financement* : ADEME Graine, 475 000 €, Coordinateur du projet : Avril ; co-leader scientifique et coordinateur en interne : **D. Houben** (UniLaSalle), 2023-2025.
- Évaluation de stratégie de reconstruction de sol sur la ZAC Toulouse Aerospace, *Financement* : Oppidea, 43 350 € + 65 400 €, leader : **D. Houben** (UniLaSalle), 2023 - 2027.
- Effet du biochar de résidus de blé sur la culture du blé et le fonctionnement du sol, *Financement* : ETIA, 31 000 €, leader: **D. Houben** (UniLaSalle), 2021 – 2024.
- Clôturé* Gestion de la fertilité des sols par séquestration de C stable issu de la conversion thermo-chimique des biomasses résiduelles de la filière « compost » (FUI Biochar 2021), *Financement* : FUI et FEDER, 1 979 000 €, Coordinateur du projet : ETIA ; leader scientifique et coordinateur en interne : **D. Houben** (UniLaSalle), 2017-2023.
- Évaluation de l'effet du frass de mouche soldat noir sur la fertilité des sols, *Financement* : Innovafeed, 21 120 €, leader : **D. Houben** (UniLaSalle), 2023.
- Évaluation de formules frass-cuticules sur les performances agronomiques des plantes, *Financement* : Ynsect, 9000 €, leader: **D. Houben** (UniLaSalle), 2022.
- Identification d'indicateur de suivi de la qualité des sols agricoles après réhabilitation de carrières de sable, *Financement*: Sibelco, 10 000 €, leader: **D. Houben** (UniLaSalle), 2021 – 2022.
- Évaluation du fonctionnement des sols après réhabilitation de carrières de sable, *Financement*: Sibelco, 12 000 €, leader: **D. Houben** (UniLaSalle), 2021.
- Frass (insect excreta): a potential fertilizer for horticulture? *Financement*: Ynsect, 12 000 €, leader: **D. Houben** (UniLaSalle), 2018-2020.
- Effects of frass (insect excreta) on soil fertility and crop yield: A preliminary investigation, *Financement*: Ynsect, 17 000 €, leader: **D. Houben** (UniLaSalle), 2017-2018.

Impact of increasing plant functional diversity in cover crops on soil biota and nutrient availability, *Financement: APAD*, 3000 €, co-leaders: A.M. Dulaurent, M.P. Faucon, **D. Houben** (UniLaSalle), 2016-2017.

Impact of direct seeding mulch-based cropping system on soil biodiversity and fertility, *Financement: APAD*, 3 000 €, co-leaders: A.M. Dulaurent, M.P. Faucon, **D. Houben** (UniLaSalle), 2015-2016.

2.3.2. Projets de recherche et de prestation en tant que collaborateur

THREE C: Creating and sustaining Charcoal value chains to promote a Circular Carbon economy in NWE Europe, *Financement: Interreg VB NEW*, 5 616 950 €, leader: University of Kassel, 2019-2023.

Ad'Métha – Pour un approvisionnement durable des méthaniseurs agricoles par expérimentations de systèmes de culture innovants, *Financement : Région Hauts-de-France et FEADER*, 560 000 €, leader : Chambre Régionale d'Agriculture des Hauts-de-France, 2020 – 2023.

Soja Made in Normandie – SMN, *Financement: Région Normandie*, 829 691€, leader: Jean-Christophe Avice (Université de Caen Normandie), 2020-2023

Utilisation du Silicium et des Terres rares pour mieux tracer et comprendre la bio-Disponibilité du Phosphore dans les sols agricoles (SiTerrDisPho), *Financement : SFR Condorcet*, 10 000 €, leader : Olivier Pourret (UniLaSalle), 2019-2020

Agroécologie des cultures intermédiaires - Effet des traits fonctionnels et de leur agrégation sur la disponibilité du phosphore dans les sols cultivés du nord-est de la France (TraitPhor), *Financement : Vivescia*, 230 000 €, Project leader : M.P. Faucon (UniLaSalle), 2018-2020.

DIVERCROP - Land system dynamics in the Mediterranean basin across scales as relevant indicator for species diversity and local food systems, *Financement: ERA-Net ARITMnET2*, 1 158 000 €, leaders: Claude Napoléone and Marta Debolini (INRA Avignon), 2017-2020

Etude de l'influence des boues d'épuration urbaines et de leur transformation sur la dynamique du carbone et du phosphore dans les Luvisols cultivés du nord-ouest de la France (STEPHOR), *Financement : SEDE and SIAAP*, 250 000 €, leader : M.P. Faucon (UniLaSalle), 2015-2018.

Cost Action: Biochar as option for sustainable resource management, A ring-trial to evaluate the impact of biochar on metal bioavailability, leader: Gerhard Soja (Austrian Institute of Technology), 2015-2017.

Etat des lieux du taux de saturation en phosphore des sols agricoles de la Région wallonne et perspectives d'évolution compte tenu des apports de matière organique (SATUPHOS), leader : Ph. Sonnet (UClouvain), 2008-2011.

Etude de la qualité des sols et des eaux souterraines en zones urbaines et industrielles en Région wallonne (POLLUSOL 2), leader (UClouvain) : Ph. Sonnet

Role of silicon on the mobility and recycling of trace metals in the soil-plant system, using an integrated approach combining both isotopic (Si, Zn), geochemical (and physiological) characterizations of the plant and its substrate, Project leaders: N. Mattielli (ULB), S. Opfergelt (UClouvain).

2.4. Activités d'encadrement

2.4.1. Co-direction de doctorant

2024 - 2027 **Estelle Jacquin**. Evaluation de la refunctionalisation de sols reconstitués dans le cadre de la réhabilitation de friches industrielles à travers l'étude des interactions sol-flore-faune du sol, UniLaSalle, co-supervision : D. Houben (50%), A.M. Dulaurent (50%).

2019 - 2022 **Issifou Amadou**. Unravelling the role of phosphorus (P) forms on the efficacy of renewable P sources to improve P availability, UniLaSalle, co-supervision: D. Houben (50%), M. P. Faucon (50%). Date de soutenance: 20/12/2022.

La thèse a actuellement généré trois publications (numéro 7, 13 et 15 dans la « Liste des publications ») et deux autres sont en préparation.

Issifou Amadou est aujourd'hui en postdoc à l'Université de Poitiers au sein de l'UMR 7285 IC2MP HydrASA.

2017- 2020 **Nicolas Honvault**. Role of plant functional traits on phosphorus cycling and availability in agroecosystems: cover crop agroecology, UniLaSalle, co-supervision: M.P. Faucon (50%), D. Houben (50%). Date de soutenance: 18/11/2020.

La thèse a actuellement généré trois publications (numéro 1, 16 et 21 dans la « Liste des publications »).

Après avoir effectué un postdoctorat de 12 mois à UniLaSalle (valorisé dans les publications numéro 5, 6, 8, 9 et 10) sous ma supervision, Nicolas Honvault est aujourd'hui en postdoc au CNRS – Ecotron de Montpellier, Université de Montpellier.

2015 - ... **Etienne Michel**. Impact of sewage sludge application on phosphorus availability and crop residue decomposition in various cropping systems, UniLaSalle, co-supervision: M.P. Faucon (33%), D. Houben (33%), H. Lambers (33%) (non terminée).

Bien que non finalisée par le candidat, les travaux initiés dans cette thèse ont généré deux publications (numéro 27 et 28 dans la « Liste des publications »).

2.4.2. Encadrement ou co-encadrement de postdoc

2021-2022 **Manhattan Lebrun**. Impact of different biochar-compost mixtures on nutrient availability in soils. INRAE, UniLaSalle, co-supervision: C. Rumpel, D. Houben

2021-2022 **Charlotte Vedere**. Impact of biochar-compost mixture on soil water and plant growth under drought stress. INRAE, UniLaSalle, co-supervision: C. Rumpel, D. Houben

2021-2022 **Nicolas Honvault**. How biochar mediate plant-plant interaction? UniLaSalle, supervision: D. Houben

2017-2019 **Cécile Nobile**. Assessment of the potential of biochar and compost to improve soil fertility, UniLaSalle, supervision: D. Houben

2.4.3. Encadrement d'étudiant en Master

2023 **Emma Pluchard**: Investigating the effect of mealworm frass and cuticle on nematodes in soil, UniLaSalle, co-supervision: A.M. Dulaurent and D. Houben

2023 **Lucile Mirabello**: Impact of black soldier fly frass on soil fertility and plant growth, UniLaSalle, co-supervision: D. Houben and A.M. Dulaurent

- 2023 **Alexis Cousin**: The use of biochar and compost for the construction of Technosol: impact on soil properties and plant traits, UniLaSalle, co-supervision : D. Houben and L. Kervroëdan
- 2022 **Richard Dottori**: Feedback between soil meso- and macrofauna and biochar: implications for crop productivity, UniLaSalle, co-supervision: D. Houben and A.-M. Dulaurent
- 2021 **Roxane Siloret**. Evaluation of soil functioning after sand quarry rehabilitation, UniLaSalle, supervision: D. Houben
- 2019 **Andre Danae Gomez Suarez**. Effect of nitrogen forms on struvite dissolution in the rhizosphere of ryegrass, UniLaSalle, supervision: D. Houben
- 2018 **Julia Denier**. Assessing the potential of biochar as a substitute for peat in growing media, UniLaSalle, supervision: D. Houben
- 2017 **Elodie Fouché**. Effects of sewage sludge application on the structure of soil fauna communities in agrosystems, UniLaSalle/ University of Rouen, co-supervision: D. Houben, A.M. Mercadal, M. Chauvat.
- 2016 **Romain Emiel**. Relationship between root traits and plant diversity in calcareous grasslands, UniLaSalle, co-supervision: M.P. Faucon, D. Houben.
- 2015 **Bich Ngoc Tran**. Impact of biochar on metal and rare earth elements mobility in soils, UniLaSalle, co-supervision: D. Houben, L.V. Hoang.
- 2011 **Laurent Evrard**. Combining the carbon sequestration and the production of bioenergy crops in heavy metal-contaminated soils. UCL, co-supervision : Ph. Sonnet, D. Houben .
- 2011 **Guillaume Tricot**. Heavy metal release by anthropic substrates as affected by plants. UCL, co-supervision : Ph. Sonnet, D. Houben .
- 2010 **Jonathan Piricar**. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability. UCL, co-supervision : Ph. Sonnet, D. Houben .

2.5. Rôle d'éditeur, de relecteur, et d'évaluateur

Je suis éditeur associé pour le journal *Agronomy* depuis 2019 et pour le journal *Water, Air, & Soil Pollution* depuis 2024. J'ai également été éditeur invité pour *Frontiers in Sustainable Food Systems* en 2021 (numéro spécial intitulé "Frass: the Legacy of Larvae – Benefits and Risks of Residues from Insect Production") et pour *Frontiers in Soil Science* en 2022 (numéro spécial intitulé « Global Excellence in Soil Pollution and Remediation: Europe 2022 »).

Je suis relecteur régulier pour de nombreux journaux internationaux à comité de lecture (114 révisions sur ma page WebOfScience) parmi lesquels les principaux sont (> 5 articles révisés): *Agriculture, Ecosystems and Environment* ; *Geoderma* ; *Chemosphere* ; *Environmental Science and Pollution Research* ; *International Journal of Phytoremediation* ; *Plant and Soil* ; *Ecotoxicology and Environmental Safety* ; *Environmental Science & Technology* ; *Journal of Hazardous Materials* ; *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* ; *Journal of Soils and Sediments* ; *Science of the Total Environment*.

J'ai également eu l'opportunité d'être membre du jury de thèse Yolanda Ameijeras Marino (2017, UCLouvain, Belgique), Adeline Janus (2017, ISA Lille, France) et Nthathi Lillian Monei (2023, TalTech University, Lituanie).

Enfin, à plusieurs reprises, j'ai été amené à évaluer des projets nationaux et internationaux, notamment pour l'ANR, l'ADEME, le United States-Israel Binational Agricultural Research and Development Fund (BARD), le Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), le CNRT Nouvelle Calédonie, le Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, la Sultan Qaboos University, la Czech Science Foundation, le Fonds Wetenschappelijk Onderzoek - Vlaanderen (FWO), ...

2.6. Activités d'enseignement

Cours enseignés à UniLaSalle de 2013 à 2021 (CM 94 h, TD: 70 h; TP & Terrains : 50 h ; autoformation (AF): 23 h)

Intitulé du module	Responsable du module	CM	TD	TP & terrains	AF
Pédologie et qualité des sols	x	4			4
Gestion des sols dans les agroécosystèmes	x	23	12	12	
Génie pédologique au service de la restauration des sols	x	13			
Introduction aux sols du monde	x	14	4		
Environmental biogeochemistry (Spring Semester)	x	12			3
Ressources sols et eaux 1 : menaces et pollutions	x	6			
Pédologie	x	5			
Valorisation des déchets organiques		8	4	16	
Maitrise du peuplement végétal		3			
Introduction à la gestion du sol		4		14	
Plant breeding in Agroecology		2			
Ecologie des populations et des communautés				8	
Projet pédagogique de mise en situation professionnelle			50		16

Cours enseignés à UniLaSalle à partir de 2021 (CM 50 h, TD: 44 h; TP & Terrains : 26 h)

Suite à la réforme du cycle ingénieur ainsi qu'à ma prise de fonction de Directeur du Collège Agrosociences, ma charge de cours a significativement baissé depuis 2021 :

Intitulé du module	Responsable du module	CM	TD	TP & terrains	AF
Gestion des sols dans les agroécosystèmes	x	14	8	3	
Génie pédologique au service de la restauration des sols	x	10	4		
Ressources sols et eaux 1 : menaces et pollutions	x	6			
Pédologie	x	5			
Valorisation des déchets organiques		6	6	9	
Ecological engineering		2			
Maitrise du peuplement végétal		3			
Introduction à la gestion du sol		2		14	
Plant breeding in Agroecology		2			
Projet pédagogique de mise en situation professionnelle			30		

3. Bilan de mes activités de recherche

La direction que prennent les chemins de vie est souvent le fruit de hasards et de rencontres. Aussi, il me serait difficile d'évoquer mon bilan de recherche au lecteur et de lui faire cerner sa cohérence rationnelle et irrationnelle sans commencer par les événements qui ont fait, probablement fortuitement, germer en moi cette envie de travailler dans la recherche.

Mes premiers pas dans la recherche se firent lors de mon mémoire de fin d'étude conduit à l'Université catholique de Louvain (UCL, Belgique) en 2006. Pour être tout à fait honnête, à cette époque, bien que fasciné par les sols, je ne m'imaginai pas chercheur et encore moins enseignant dans ce domaine. Je me voyais plutôt travailler dans une sorte de bureau d'étude au sein duquel mes missions auraient été de mettre en œuvre des stratégies destinées à refunctionaliser les sols dégradés, en particulier en raison de la pollution inhérente au passé industriel de la Belgique. C'est donc tout naturellement que j'avais approché un de mes enseignants en science du sol, le Professeur Bruno Delvaux, en lui demandant s'il avait un sujet de mémoire sur la pollution des sols à me confier. Par chance, une de ses doctorantes, Eléonore Couder, étudiait au même instant le comportement du zinc dans le système sol-plante de milieux contaminés. Après quelques discussions avec les principaux protagonistes, l'affaire fut rapidement réglée : je ferai mon mémoire de fin d'étude sous l'encadrement d'Eléonore Couder et la supervision de Bruno Delvaux et traiterais de l'impact des propriétés de sols contrastés sur la lixiviation du zinc à l'unité des Sciences du Sol de l'UCL. Passionné par le sujet et bénéficiant d'un encadrement hors du commun, je m'immergeai rapidement dans le monde de la recherche, découvrant cette abondante littérature scientifique et menant, selon un subtil mélange d'autonomie et d'encadrement, mes premières expérimentations. De fil en aiguille, mon projet professionnel se redessina et, en fin d'année, ce fut décidé : je voulais continuer en recherche pour découvrir, avec l'attendrissante naïveté qui caractérise un jeune diplômé, de nouvelles choses !

Mon diplôme en poche, j'eus, pendant l'année qui suivit mes études, l'opportunité de travailler en tant qu'assistant de recherche sur le projet SATUPHOS. L'objectif de ce projet, conduit au sein de l'unité des Sciences du Sol de l'UCL sous la supervision du professeur Philippe Sonnet, était de faire un état des lieux du degré de saturation en phosphore des sols de Wallonie. En parallèle de cette première mission et soutenu par le professeur Sonnet, je déposai un dossier de candidature auprès du FRIA (Fonds pour la Recherche dans l'Industrie et l'Agriculture) pour l'obtention d'une bourse de doctorat que je percevais dorénavant comme l'étape inévitable pour atteindre mes objectifs professionnels.

Ayant eu la chance d'obtenir cette bourse, j'entamai en 2009, et ce pour une durée de quatre ans, une thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique sous la supervision de Philippe Sonnet. Mon sujet de thèse initial portait sur l'amélioration de la compréhension des facteurs gouvernant la spéciation et la mobilité des métaux (zinc, cadmium et plomb) dans les milieux anthropisés. Cependant, très rapidement, d'autres questions vinrent se greffer à ce sujet. Premièrement, les résultats de nos premières expérimentations ayant mis en évidence l'importance de considérer l'influence de l'activité racinaire dans l'évaluation du potentiel de transfert des métaux, nous nous focalisâmes sur l'amélioration de la compréhension des processus rhizosphériques impactant la mobilité et la disponibilité des métaux en mobilisant de nouvelles techniques, basées notamment sur le fractionnement isotopique des métaux au sein du système sol-plante. Deuxièmement, attentifs au récent engouement scientifique porté au biochar, ce résidu solide de la pyrolyse de la biomasse mis à l'honneur par les recherches sur les *Terra preta* (Atkinson et al., 2010) et convoité pour sa capacité à séquestrer le carbone sur le long terme (Woolf et al., 2010), nous décidâmes également d'intégrer ce nouveau matériau dans nos expérimentations destinées à identifier l'impact d'amendements sur la mobilité des métaux et la fertilité des sols contaminés. Bien que ce ne fut pas son objectif, cette décision joua un rôle important sur la visibilité de mes travaux

compte tenu de l'emballage démesuré de la communauté scientifique et du grand public pour le biochar durant la décennie suivant la fin de ma thèse. De manière générale, mes travaux de thèse permirent d'améliorer la compréhension de l'influence des processus pédologiques et biogéochimiques sur la mobilité des métaux dans les sols tout en mettant en évidence le potentiel que pouvaient présenter certains amendements, dont le biochar, dans la refunctionalisation des sols contaminés. Animées par le souhait de développer une approche pluridisciplinaire et multi-échelles, mes recherches se penchèrent sur les réactions physico-chimiques impliquant les constituants du sol ainsi que sur les cycles biogéochimiques au sein des écosystèmes terrestres, en passant de l'analyse de la réactivité d'une phase minérale simple soumise à l'activité racinaire à l'estimation des rendements culturaux et des transferts sol-biomasse des métaux. Ces travaux donnèrent lieu à la publication de sept articles dans des revues scientifiques internationales. En sus de mon fort intérêt pour le sujet traité dans ma thèse, je dois reconnaître que j'ai eu la chance de bénéficier d'un cadre particulièrement propice à mon épanouissement intellectuel. Ainsi, l'autonomie, la flexibilité et la confiance que m'a accordées mon directeur de thèse ont de toute évidence grandement contribué à ma volonté de poursuivre en recherche à l'issue de mon doctorat.

A la suite de diverses fortunes, je suis arrivé en 2013 à UniLaSalle pour occuper un poste d'enseignant-chercheur en science du sol. La nature de mes enseignements, principalement destinés à de futurs ingénieurs en agronomie spécialisés en agroécologie, et mon intégration au sein de l'unité de recherche HydrISE (aujourd'hui fondue dans l'unité AGHYLE), m'ont offert l'opportunité d'élargir mon champ d'investigation, en l'ouvrant à des thématiques spécifiques aux agroécosystèmes et en intégrant de nouvelles composantes du système, telles que les traits végétaux ou les organismes du sol et leurs fonctions dans la dynamique des éléments et le fonctionnement du sol. Je n'ai en soi pas abandonné l'étude de l'impact des processus rhizosphériques sur la mobilité des éléments ou de l'effet des amendements, dont le biochar, sur le fonctionnement des sols ; j'ai plutôt transposé mes précédentes recherches à un nouveau modèle d'étude, celui de l'agroécosystème cultivé, et à de nouveaux enjeux et défis. Parmi ces derniers, je me suis particulièrement intéressé à la nécessité de réduire l'apport d'intrants minéraux dans les sols. L'élément modèle sur lequel ces recherches ont principalement porté est le phosphore. D'autre part, dans la continuité de mes travaux de thèse, je me suis également penché sur l'étude de l'impact de divers amendements sur le fonctionnement des sols et, en particulier, leurs conséquences en matière de fertilité. Mon arrivée à UniLaSalle m'a permis de travailler à de nouvelles échelles. En effet, la présence d'une exploitation agricole sur le site dont une partie de la surface peut être allouée à la mise en place de parcelles expérimentales m'a offert la possibilité de conduire des recherches *in situ*, en conditions réelles d'usage. Ce terrain de jeu unique est idéal pour valider les résultats obtenus en conditions contrôlées tout en intégrant de nouvelles composantes du système (faune du sol, aléas climatiques, intégration des pratiques et techniques de cultures, ...).

Le bilan de mes activités de recherche que je dresse dans la suite de ce mémoire retrace avec synthèse l'évolution de mes questions de recherche et, en particulier, celles gravitant autour de l'impact des interactions sol-plante sur la mobilisation des éléments nutritifs et des métaux et de l'étude des amendements organiques dans l'amélioration du fonctionnement des sols dégradés ou des sols agricoles. Pour éviter de servir une soupe soporifique au lecteur qui a eu la gentillesse de me lire, j'ai choisi de ne pas mettre en évidence la totalité des actions de recherche que j'ai menées mais plutôt de sélectionner seulement une partie d'entre elles afin de gagner en fluidité tout en cherchant à montrer la cohérence de mes réflexions.

3.1. Les interactions sol-plante au cœur de la régulation de la disponibilité des éléments : des métaux au phosphore

3.1.1. Introduction

Conceptualisée pour la première fois par Hiltner (1904), la rhizosphère est le volume de sol soumis à l'influence directe de l'activité des racines (Darrah, 1993). Ce micro-environnement concentre une grande partie de la biodiversité terrestre et constitue probablement l'un des habitats les plus dynamiques de la planète (Jones and Hinsinger, 2008). Au sein de cet environnement unique, les processus biogéochimiques peuvent fortement différer de ceux qui se produisent dans le sol adjacent (« bulk soil ») (Hinsinger et al., 2005). Au rythme de la dynamique spatio-temporelle de leur croissance, les racines influencent les propriétés du sol qui les entoure en modifiant les concentrations en éléments nutritifs et le pH de la solution du sol ou encore en sécrétant différentes enzymes et autres molécules organiques (carboxylates, hormones, phytosidérophores, ...). Toutes ces modifications induites par l'activité racinaire affectent la dynamique et la disponibilité des éléments présents dans le sol (Figure 1) et, de manière plus générale, le fonctionnement de l'agroécosystème. Il y a 20 ans, Sparks (2001) soulignait que la compréhension des processus chimiques opérant au sein de la rhizosphère constituait l'un des champs d'investigations les plus importants à mettre en place afin d'améliorer le fonctionnement du sol. En 2009, Hinsinger et al. (2009) rappelaient que malgré son importance centrale pour tous les organismes vivants dans et sur le sol, nous ne connaissons que trop peu le fonctionnement de la rhizosphère pour pouvoir imaginer la manipuler à notre avantage. En 2011, Wenzel et al. (2011) quant à eux insistaient sur l'importance de poursuivre les recherches sur la rhizosphère afin de mieux appréhender les processus gouvernant les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs et des éléments traces, notamment dans le but de gérer au mieux leur disponibilité pour les plantes et leur potentiel de transfert vers les nappes et les eaux de surface. Les travaux de recherche conduits ces dix dernières années ont amélioré significativement la compréhension des processus opérant au sein de la rhizosphère, reconnaissant indiscutablement leur importance dans le contrôle de la sécurité alimentaire et de la qualité de l'environnement (Wang et al., 2022). Dans cette section, je m'attèle à illustrer, à l'aide de quelques résultats issus de ma thèse puis, surtout, de mes activités de recherche à UniLaSalle, l'évolution de mes réflexions sur la prise en compte de la compréhension de l'impact de l'activité racinaire sur la disponibilité des éléments dans l'optimisation du fonctionnement des (agro)écosystèmes.

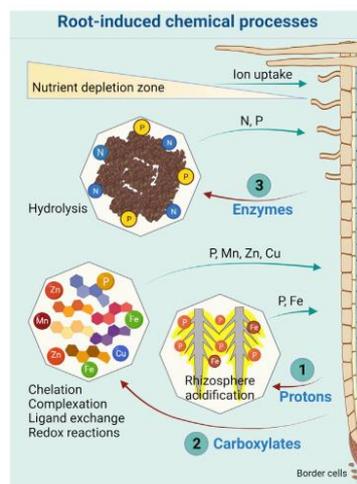


Figure 1. Modification des propriétés chimiques induites par l'activité racinaire au sein de la rhizosphère (Wang et al., 2022).

3.1.2. Mobilisation et immobilisation des métaux au sein du système sol-plante : impact de l'activité racinaire

Processus de mobilisation

Mes premiers travaux de recherche visant à déterminer l'impact de l'activité racinaire sur les processus contrôlant la mobilité et la disponibilité des éléments se sont focalisés sur les métaux et les environnements contaminés. En effet, mon sujet de thèse traitait de la réhabilitation des sols contaminés en métaux (zinc, plomb, cadmium, ...), notamment à travers leur revégétalisation. Plus spécifiquement, il s'agissait de comprendre comment l'implantation d'un couvert végétal pouvait altérer la dynamique des contaminants et, potentiellement, favoriser les risques de transferts vers la nappe ou les organismes vivants.

Bien qu'ils soient très variables et dépendent des contaminants concernés, des propriétés du sol, des conditions du site, etc., les coûts associés à l'élimination des métaux des sols au moyen des méthodes physicochimiques traditionnelles sont généralement prohibitifs lorsqu'il s'agit de réhabiliter de vastes zones contaminées (Alkorta et al., 2004). Les deux dernières décennies ont vu l'émergence de techniques d'assainissement « douces » reposant sur l'utilisation de différentes espèces végétales (Kidd et al., 2009). Ces phytotechnologies, connues sous le nom de phytoremédiation, sont généralement considérées comme moins invasives, moins coûteuses, et davantage restauratrices de la structure et des fonctions du sol que les technologies conventionnelles. Cependant, il est important de garder à l'esprit que l'activité racinaire impacte les processus gouvernant la solubilité, la spéciation, la biodisponibilité et la mobilité des métaux (Wenzel et al., 2011). La compréhension du comportement des métaux dans la rhizosphère est donc essentielle non seulement parce qu'elle affecte directement l'utilisation potentielle de plantes pour restaurer les sols contaminés, mais aussi parce que la rhizosphère constitue une porte d'entrée privilégiée des métaux dans la chaîne alimentaire.

Les travaux que j'ai pu mener par le passé ont notamment mis en évidence le rôle que joue l'activité racinaire dans l'accélération de l'altération des minéraux et ses conséquences en matière de libération des métaux. Ainsi, au cours d'une expérimentation conduite en conditions contrôlées (Figure 2A) (Houben and Sonnet, 2012), la mise en contact de smithsonite ($ZnCO_3$) avec un tapis racinaire de *Lolium multiflorum* a fortement accru la libération de zinc par ce minéral (Figure 2B et C) probablement en raison de l'exsudation de composés organiques solubles par les racines (Figure 2D). Les acides organiques et, en particulier les acides carboxyliques, sont connus pour jouer un rôle clé dans l'altération des minéraux (Jones, 1998). Ces molécules chélatent les métaux et forment des complexes organo-métalliques, ce qui impacte les équilibres chimiques en solution et donc la cinétique de dissolution des minéraux.

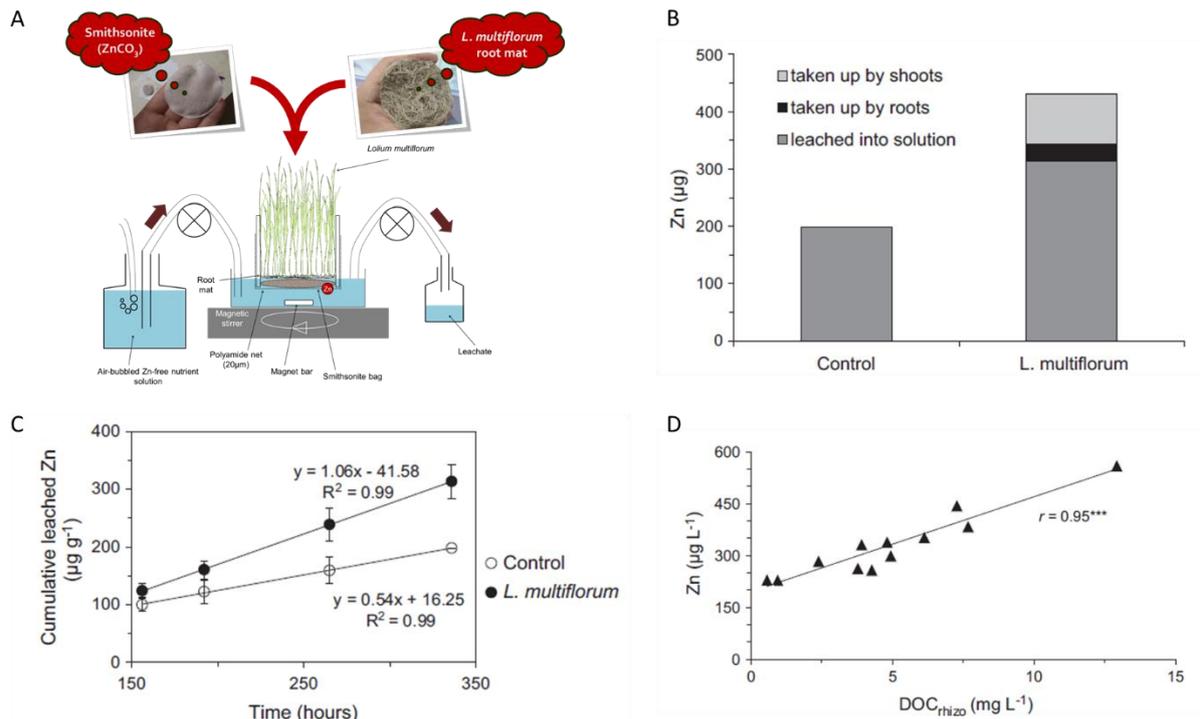


Figure 2. A. Dispositif expérimental utilisé pour étudier l'effet de l'activité racinaire sur l'altération de la smithsonite ; B. Quantités de Zn exportées dans les lixiviats, les racines et les parties aériennes. C. Quantité cumulée de Zn libéré dans les lixiviats par la smithsonite en fonction du temps en l'absence (contrôle) ou en présence de *Lolium multiflorum*. Le coefficient de pente des régressions linéaires (lignes droites) indique le taux de libération de Zn dans les lixiviats. D. Corrélation entre la concentration en Zn et la concentration en C organique dissous des composés organiques produits par l'activité de la rhizosphère (DOC_{rhizo}) dans les lixiviats. Le coefficient de corrélation (r) est le coefficient de corrélation de Pearson significatif au niveau de probabilité de 0,001 (Houben et Sonnet, 2012).

Au-delà d'engendrer une exportation plus importante, l'impact de l'activité racinaire sur la mobilisation des métaux a également des conséquences sur leur fractionnement isotopique au sein du système sol- plante (Houben et al., 2014). En effet, j'ai pu montrer que l'acidification du sol par les racines peut non seulement augmenter la lixiviation du zinc (Figure 3) mais également induire une modification significative de la signature isotopique en zinc des lixiviats (Figure 4).

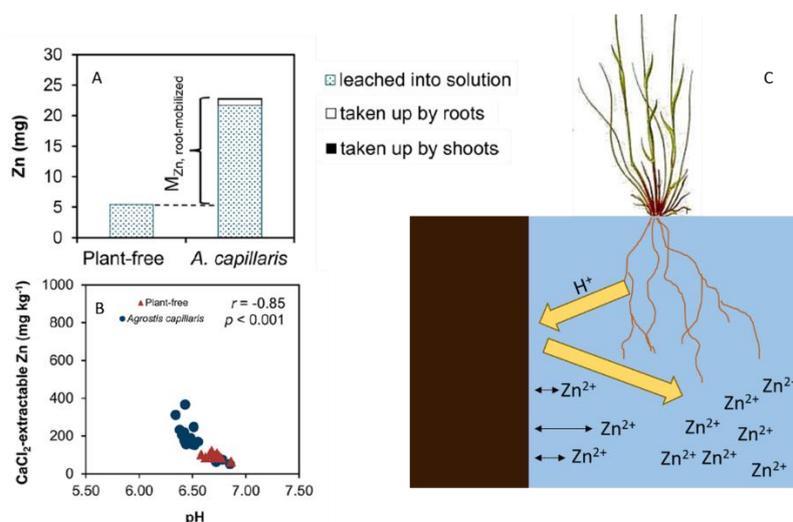


Figure 3. A. Bilan massique de la quantité de Zn libéré dans les lixiviats et absorbé par les racines et les parties aériennes en l'absence (Plant-free) ou en présence d'*Agrostis capillaris* à la fin de l'expérience. L'accolade intitulée « MZn, root-mobilized » représente la masse supplémentaire de Zn qui est libérée par les racines. B. Corrélation entre les concentrations en zinc extrait au 0.01 M CaCl₂ et le pH du sol en fin d'expérience. C. Illustration de l'effet l'acidification rhizosphérique sur la libération du zinc par la phase solide (Houben et al., 2014).

Comme nous l'avons montré dans d'autres études auxquelles j'ai contribué, les isotopes du zinc peuvent être utilisés pour tracer l'évolution des phénomènes affectant sa distribution au sein des constituants du sols (Opfergelt et al., 2017) et du système sol-plante (Couder et al., 2015). La signature isotopique en zinc des rivières et des lixiviats est aussi habituellement utilisée comme un proxy des sources de pollution (Desautly and Petelet-Giraud, 2020). Notre étude sur l'impact de l'activité racinaire sur la libération de zinc par le sol et ses conséquences sur la signature isotopique du zinc dans le système lixiviat-sol-plante a donc mis en évidence le rôle important que pouvaient jouer les processus rhizosphériques non seulement dans l'augmentation de la libération du zinc dans les lixiviats mais également dans l'utilisation potentielle des isotopes du zinc comme traceurs du cycle biogéochimique du métal. De manière générale, ces études ont souligné l'importance de prendre en compte l'effet des racines sur la mobilité des métaux dans les sols lors de la mise en place de stratégies visant à revégétaliser les sites pollués. Si la présence de plantes peut limiter les transferts horizontaux des contaminants en agissant comme barrière physique contre le ruissellement et l'érosion, l'activité racinaire peut en revanche mobiliser les métaux et accroître leur concentration en solution, augmentant, par-là, les risques de transferts verticaux ou vers les organismes.

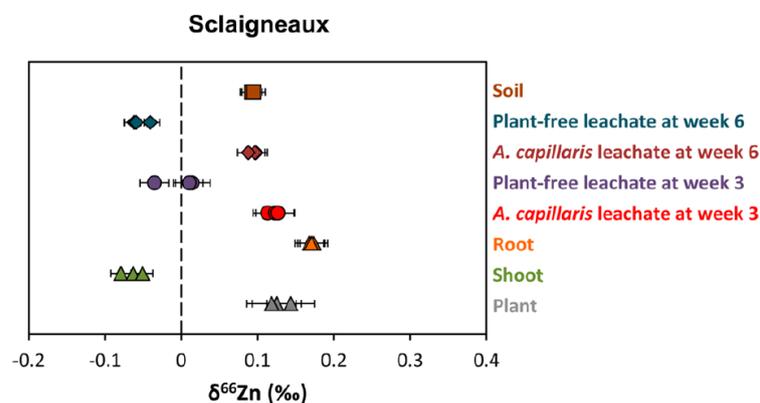


Figure 4. A. Signature isotopique des différents compartiments du système. On peut remarquer que les lixiviats récoltés après 3 et 6 semaines d'expérience en absence (Plant-free) ou en présence de plante (*A. capillaris*) ont une signature isotopique différente : les lixiviats récoltés en présence de plantes sont davantage enrichis en isotopes lourds par rapport aux lixiviats échantillonnés en absence de végétaux (Houben et al., 2014).

Conséquences de l'activité racinaire sur l'efficacité des stratégies d'immobilisation des métaux

Au cours de ces 20 dernières années, l'immobilisation *in situ* des métaux a suscité beaucoup d'intérêt en tant que technique pour réhabiliter les sols pollués (Derakhshan Nejad et al., 2018; Lwin et al., 2018). Cette technique vise à réduire le risque de contamination des eaux souterraines, l'absorption par les plantes et l'exposition d'autres organismes vivants en immobilisant les métaux à l'aide d'amendements. L'objectif principal de l'incorporation de tels amendements n'est donc pas d'abattre la concentration totale en métaux mais bien de réduire la mobilité et la toxicité des métaux en accélérant les principaux processus d'immobilisation tels que l'adsorption, la précipitation, la complexation et les réactions d'oxydoréduction (Houben et al., 2012). Immobilisés, les métaux sont moins disponibles pour les organismes vivants. La colonisation du sol par des espèces végétales et animales devient alors plus aisée et, de manière générale, le fonctionnement du site s'en voit amélioré, celui-ci délivrant de nouveaux services et assurant de nouvelles fonctions (Yan et al., 2020). Lors de mes précédents travaux, j'ai notamment pu montrer que l'utilisation de fer zéro-valent sous forme de

poudre (Houben et al., 2012) ou de biochar (Houben et al., 2013a, 2013b) dans les sols contaminés peut favoriser l'immobilisation des métaux. Cependant, pour que ces techniques soient efficaces sur le long terme, il est important d'évaluer la mesure dans laquelle les processus d'immobilisation sont réversibles. Mes premières études ayant démontré que l'activité racinaire pouvait avoir un impact significatif sur la mobilisation des métaux, il est donc paru essentiel d'identifier le rôle que pouvaient jouer les processus rhizosphériques dans l'efficacité des amendements à immobiliser les métaux.

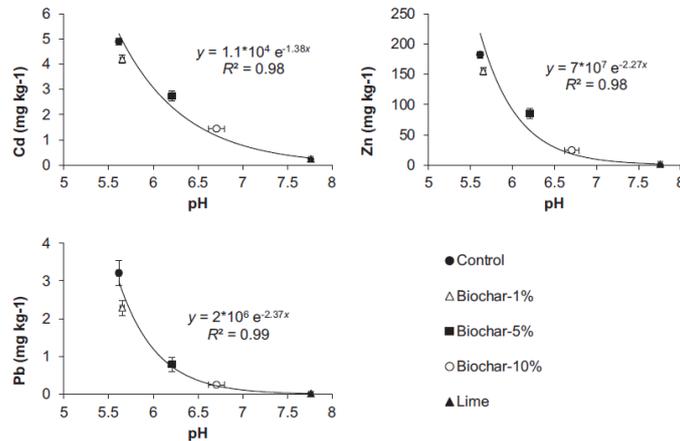


Figure 5. Concentration en métaux disponibles (extraits au 0.01 M CaCl₂) en fonction du pH. On voit que plus le pH augmente, plus la concentration en métaux diminue (Houben et al., 2013a).

Mes travaux sur l'utilisation du biochar en tant qu'amendement immobilisateur de métaux ont démontré un potentiel intéressant du biochar de miscanthus pour réduire la mobilité et la disponibilité de ces contaminants. Cette immobilisation s'est révélée être principalement liée à l'augmentation du pH du sol induit par l'apport de biochar (Figure 5) (Houben et al., 2013a). L'augmentation du pH après apport de biochar s'explique notamment par la présence d'oxydes ou de carbonates de calcium ou de magnésium dans les cendres qui accompagnent le biochar. En se dissolvant au contact de l'eau, ces constituants augmentent le pH du sol, ce qui favorise la précipitation des métaux sous forme d'oxydes, d'hydroxydes, de carbonates ou de phosphates (Inyang et al., 2012) ou leur adsorption sur les constituants du sol dont la charge négative de surface augmente avec le pH (Ahmad et al., 2014).

Ces processus d'immobilisation induits par la présence de biochar peuvent néanmoins être entravés par l'activité racinaire. En effet, si l'apport de biochar permet de réduire la fraction échangeable des métaux (i.e. la fraction disponible à très court terme) et d'augmenter la fraction liée aux carbonates (ce qui est cohérent par rapport à l'effet du biochar sur le pH du sol) dans le « bulk soil », l'acidification de la rhizosphère induite par l'activité racinaire contrecarre ce processus d'immobilisation (Houben and Sonnet, 2015). En d'autres termes, l'effet immobilisateur du biochar sur les métaux dans le sol étant principalement lié à un effet « chaulant » du biochar, son efficacité s'amenuise à mesure que le sol se ré-acidifie, phénomène qui peut être accéléré par l'activité racinaire.

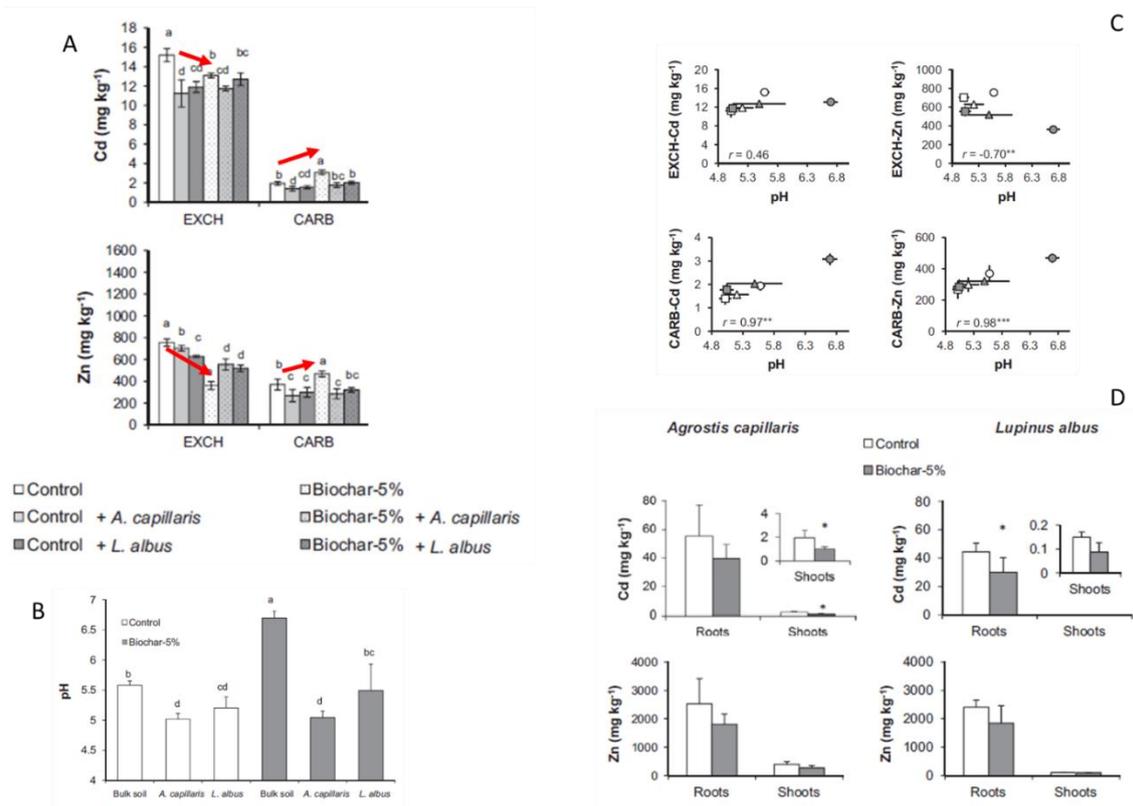


Figure 6. L'apport de biochar diminue la concentration de cadmium et de zinc dans la fraction échangeable et l'augmente dans la fraction liée aux carbonates (A). Dans la rhizosphère, la concentration en métaux dans la fraction liée aux carbonates diminue, même en présence de biochar, ce qui s'explique par l'acidification de la rhizosphère (B et C). En raison de la remobilisation des métaux dans la rhizosphère, la concentration en métaux dans les plantes n'est globalement pas affectée par la présence de biochar (D) (Houben et Sonnet, 2015).

La nécessité de considérer les processus racinaires dans l'évaluation de l'efficacité des stratégies visant à réduire la disponibilité/mobilité des métaux dans les sols ne concerne évidemment pas uniquement le biochar et pas seulement les processus d'acidification. Ceci peut notamment être illustré à l'aide d'une autre étude que j'ai conduite et qui avait pour objectif d'étudier les processus d'immobilisation/remobilisation dans un sol contaminé amendé en fer zéro-valent (Houben and Sonnet, 2020). Lorsqu'elles sont incorporées dans les sols, les particules de fer zéro-valent s'oxydent rapidement en surface (Figure 6A), formant une couche constituée d'oxydes de fer amorphes qui peut piéger les métaux. Cet effet immobilisateur réduit la fraction acido-soluble des métaux dans le sol et augmente les fractions plus stables (Figure 6B), ce qui limite le potentiel de lixiviation des métaux (Figure 6C). Cependant, cette immobilisation peut elle aussi être contrecarrée par l'activité racinaire de certaines plantes. Si l'acidification de la rhizosphère par *Lupinus albus* n'altère pas l'efficacité du fer zéro-valent à immobiliser le zinc et le cadmium (Figure 6D), l'activité racinaire de *Lolium multiflorum* induit une remobilisation du cadmium précédemment immobilisé. Une des hypothèses les plus probables pour expliquer cette remobilisation est liée la stratégie d'acquisition du fer par *L. multiflorum*. Contrairement à *L. albus*, *L. multiflorum*, en tant que Poacée, libère des phytosidérophores pour acquérir le fer (Takagi et al., 1984). Les phytosidérophores solubilisent le fer dans le sol et forment des complexes Fe-phytosidérophore qui sont ensuite absorbés dans les cellules racinaires (Curie et al., 2001). Plusieurs études ont montré que ces composés peuvent dissoudre le fer des oxydes faiblement cristallisés (Reichard et al., 2007) et remobiliser les métaux ou empêcher leur sorption sur ces constituants (Neubauer et al., 2002). Compte tenu des concentrations en fer très élevées mesurées dans les parties aériennes de *L. multiflorum* (Figure 7E), il est probable que la sécrétion de phytosidérophores ait dissous une part des oxydes de fer nouvellement formés, libérant ainsi le cadmium.

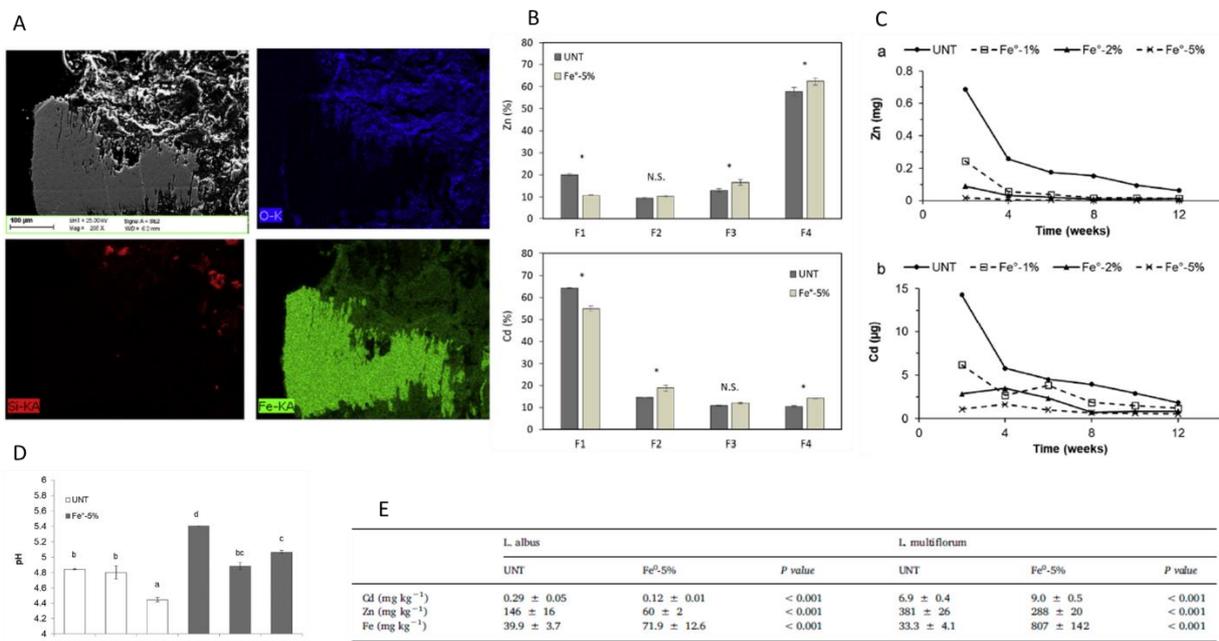


Figure 7. (A) Après avoir été incorporées dans le sol, les particules de fer zéro-valent s'oxydent. La couche d'oxydes de fer amorphes qui se forme en surface modifie le fractionnement des métaux dans le sol : **(B)** la concentration en métaux dans la fraction échangeable et acido-soluble (F1) diminue tandis qu'elle augmente dans les autres fractions, plus stables (F2, F3 et F4). **(C)** En conséquence, la lixiviation des métaux est réduite. **(D)** Au sein de la rhizosphère, quelle que soit la plante, l'activité racinaire diminue le pH du sol. **(E)** Le prélèvement de Cd par *Lolium multiflorum* n'est pas atténué par la présence de fer zéro-valent alors qu'il l'est pour *Lupinus albus*. La remobilisation du Cd par *L. multiflorum* s'explique par les modifications des propriétés du sol par l'activité racinaire, probablement la libération de phyto-sidérophores qui ont impacté la formation des oxydes de fer, expliquant la forte accumulation de fer *L. multiflorum* (Houben et Sonnet, 2020).

Comme l'ont montré les travaux exposés ci-dessus, l'activité racinaire a le potentiel de mobiliser les éléments présents dans le sol. Si, dans le cas d'éléments métalliques, cette mobilisation n'est généralement pas désirée car elle augmente les risques de transferts vers les organismes ou vers la nappe, dans le cas d'éléments nutritifs, elle est au contraire souhaitable. La section suivante traitera de mes recherches sur les conséquences des interactions sol-plante sur la disponibilité du phosphore. Cet élément a concentré la plupart de mes recherches à UniLaSalle pour différentes raisons. Premièrement, mon arrivée à UniLaSalle a coïncidé avec le montage d'un projet collectif, structurant et inter-unités porté par **Michel-Pierre Faucon** et destiné à évaluer l'« éco-efficacité de la gestion du phosphore pour la fertilité des sols et la productivité des cultures » (ECOPHOR) auquel j'ai rapidement été intégré (Figure 8). Deuxièmement, le modèle du phosphore m'a permis de mobiliser rapidement la plupart des compétences biogéochimiques que j'avais acquises durant ma thèse tout en permettant de générer de nouvelles connaissances pour la gestion des agroécosystèmes, thématique majeure de l'unité de recherche à laquelle j'ai été rattaché (HydrISE, aujourd'hui AGHYLE). Enfin, cet élément ne m'était pas totalement inconnu puisqu'avant le début de ma thèse, j'avais déjà pu participer à un projet destiné à évaluer le potentiel de saturation des sols en phosphore en Wallonie (SATUPHOS) et publié sur le sujet (Houben et al., 2011).



Figure 8. Structure du projet ECOPHOR tel qu'imaginé en 2014.

3.1.3. Compréhension et valorisation des interactions sol-plante pour améliorer la disponibilité du phosphore

Dans les systèmes cultivés, les exportations répétées de phosphore par les récoltes engendrent inévitablement une diminution du stock de phosphore disponible. Pour pallier cet appauvrissement et maintenir des rendements suffisamment élevés pour garantir la sécurité alimentaire, il est nécessaire de compenser ces exportations par des apports de fertilisants. Le phosphore des fertilisants minéraux provient principalement de l'extraction minière des gisements fossiles de phosphates naturels. Cependant, cette ressource est disponible en quantité limitée et non renouvelable. Il est en effet prédit que les réserves économiquement exploitables seront épuisées d'ici un à deux siècles (Cordell et al., 2009; Van Vuuren et al., 2010) alors même que la pratique de fertilisation phosphatée est relativement récente, celle-ci s'étant répandue après la Première Guerre mondiale (Boulaine, 2006). La nécessité de gérer durablement cette ressource minière conjuguée aux menaces environnementales causées par un excès de phosphore dans les agroécosystèmes (ex : eutrophisation des eaux continentales), impose le développement de meilleures pratiques de gestion de la fertilisation phosphatée (Fixen and Johnston, 2012). Comme nous l'avons développé dans une revue de la littérature (Faucon et al., 2015), cela passe notamment par la conception de systèmes de production agricole dans lesquels la biodisponibilité du phosphore dans les sols est accrue et les apports de fertilisants minéraux sont limités ou substitués par des intrants phosphatés issus de ressources renouvelables. Cette section traitera de cette question, à savoir comment maximiser l'utilisation du phosphore dans les sols agricoles à travers une meilleure compréhension des interactions sol-plante.

Les formes de phosphore organique : disponibilité et facteurs de variations

Le recyclage du phosphore et l'utilisation de ressources renouvelables en substitution des engrais d'origine minière est une étape indispensable pour atteindre les objectifs de durabilité et d'autonomie de fertilisation (Dawson and Hilton, 2011). Les stratégies de recyclage comprennent la récupération du phosphore à partir de déchets liquides ou solides tels que l'urine, les fèces, les eaux grises, le fumier, les carcasses, les déchets d'abattoirs (os, sang, sabots...) et les déchets alimentaires et industriels (Schroder et al., 2010). Contrairement aux engrais phosphatés conventionnels dans lesquels le phosphore est principalement sous une forme soluble facilement disponible pour les plantes, les déchets ou les fertilisants produits à partir de déchets contiennent des formes de phosphore de

disponibilité variable pour les plantes (Kahiluoto et al., 2015). Jusqu'à présent, la majorité des études s'est cependant principalement limitée à distinguer le phosphore inorganique du phosphore organique au sein de ces ressources. Or, si la dynamique du phosphore inorganique dans le système-sol plante est aujourd'hui très bien documentée, celle du phosphore organique l'est beaucoup moins, ce dernier étant le plus souvent considéré comme une « black box » dans laquelle on range tout ce qui n'est pas inorganique. Dans le cadre de la thèse d'**Issifou Amadou**, financée par le programme GoLaSalle (50%) et la Région Hauts-de-France (50%), que j'ai co-dirigée avec **Michel-Pierre Faucon**, nous avons notamment cherché à mieux comprendre comment les formes de phosphore organique interagissent avec le sol. Comme nous l'avons établi dans une revue de la littérature (Amadou et al., 2021), certaines formes de phosphore organique peuvent être tout autant disponibles que le phosphore inorganique. Cependant, les facteurs qui régulent la disponibilité des formes de phosphore organique et, en particulier, les processus d'adsorption/désorption, restent mal compris.

Sorption et désorption des formes de phosphore organique sur les minéraux du sol

Le phosphore organique présent au sein du système sol-plante provient à la fois du sol et des apports organiques. Les principales formes de phosphore organique incluent le myo-inositol hexakisphosphate (myo-IHP) (Turner et al., 2002), le glycerophosphate (GLY) (Newman and Tate, 1980) et le glucose-6-phosphate (G6P) (Deiss et al., 2018; Giles et al., 2011). Chaque forme diffère par sa teneur en P, le type de liaison et sa taille moléculaire (Figure 9). Ces formes peuvent constituer une fraction importante du phosphore total dans les sols, en particulier dans les sols amendés par des matières organiques exogènes. Toutefois, si l'utilisation des formes de phosphore organique pour fertiliser les sols est de plus en plus promue (Suliman and Mühling, 2021), leur comportement dans le sol en fonction des propriétés et des constituants des sols n'en demeure pas moins peu connu (Zhang et al., 2023).

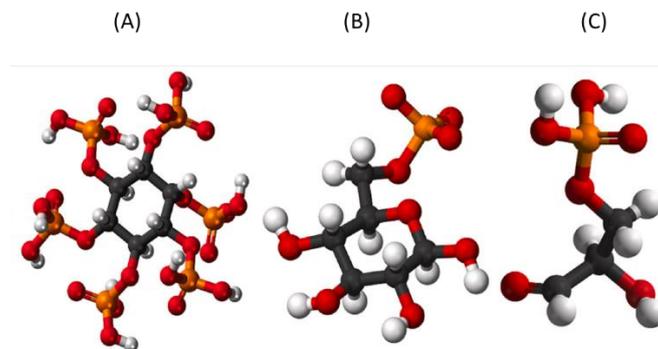


Figure 9. Structure moléculaire de différentes formes de phosphore organique (A), myo-inositol hexakisphosphate, IHP ; (B), β-D-Glucopyranose-6-phosphate, G6P ; (C) glycerophosphate, GLY(d). Adapté de Amadou et al. (2022a).

Pour pallier ce manque de connaissance, nous avons examiné la dynamique d'adsorption et de désorption de myo-IHP, GLY et G6P sur et à partir de plusieurs minéraux du sol, à savoir des oxydes de Fe et d'Al (goethite et gibbsite, respectivement) et des minéraux argileux (kaolinite et montmorillonite) (Amadou et al., 2022a). Dans l'ensemble, le myo-IHP s'est révélé être la forme la plus adsorbée, suivi du G6P puis du GLY, indiquant que l'adsorption des formes de phosphore organique augmente en fonction du nombre de groupes phosphates et/ou de la taille de la molécule organique. Les oxydes de Fe et d'Al ont montré une capacité d'adsorption des formes de phosphore organique plus élevée que les argiles, l'adsorption suivant la tendance kaolinite < montmorillonite < goethite << gibbsite (Figure 10). Cette adsorption n'est cependant pas totalement réversible puisqu'en moyenne seuls 30

% du phosphore adsorbé peut être désorbé. Sur les oxydes de Fe et d'Al, le G6P et le GLY ont été davantage désorbés que le myo-IHP, tandis que la tendance inverse a été observée sur les minéraux argileux, comme schématisé à la figure 11.

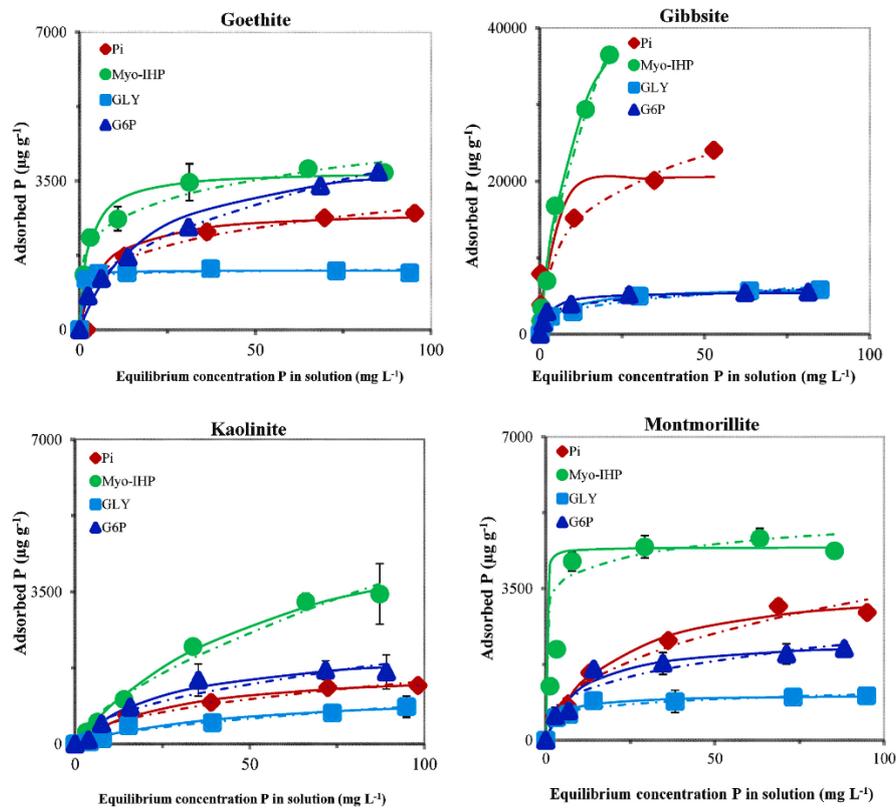


Figure 10. Isothermes d'adsorption des différentes formes de phosphore organique sur les minéraux du sol (0.1 M KCl, pH 5.5). Les lignes continues représentent les isothermes de Langmuir tandis que lignes discontinues représentent les isothermes de Freundlich (Amadou et al., 2022a).

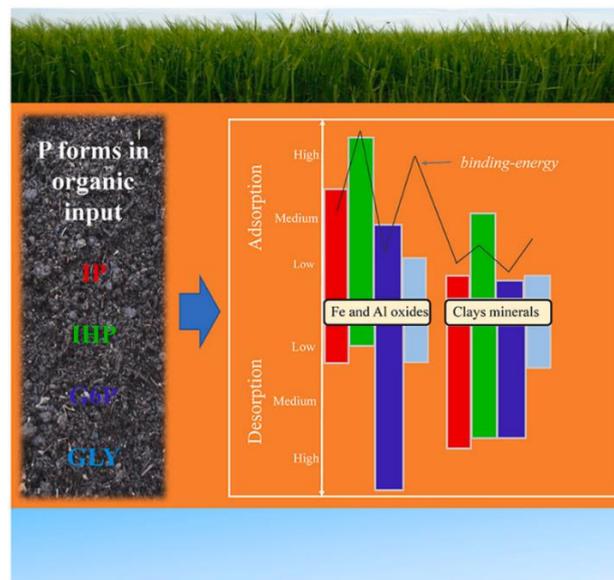


Figure 11. Représentation schématique de l'adsorption et de la désorption des formes de phosphore organique en fonction du type de minéraux dans le sol (oxydes de Fe/Al vs. minéraux argileux) (Amadou et al., 2022a).

En outre, la désorption du phosphore organique à partir des minéraux du sol suit la tendance suivante : gibbsite < goethite < kaolinite < < montmorillonite. Globalement, les différences d'adsorption et de désorption des formes de phosphore organique entre les différents minéraux testés s'expliquent

principalement par leurs différences de propriétés physico-chimiques, en particulier leur point de charge nulle (PZC) et leur surface spécifique (SSA) (Figure 12). Ainsi, quelle que soit la forme de phosphore organique étudiée, avec son PZC et sa SSA plus élevées que ceux des autres minéraux, la gibbsite s'avère être le constituant ayant la plus forte adsorption et la plus faible désorption de phosphore organique. En décryptant les interactions entre les minéraux du sol et les formes prédominantes de phosphore organique dans les sols et les engrais organiques, nos résultats offrent de nouvelles perspectives pour la gestion durable du phosphore dans les agroécosystèmes. Par exemple, malgré la faible désorption globale des formes de phosphore organique des oxydes de fer et d'aluminium, le G6P et le GLY sont plus facilement désorbés de la goethite et de la gibbsite que le phosphore inorganique. Ceci suggère que le G6P et le GLY pourraient être utilisés dans les sols tropicaux, souvent riches en oxydes de fer et d'aluminium, pour améliorer la nutrition des plantes en phosphore. Pris ensemble, nos résultats indiquent que les oxydes de fer et d'aluminium et les minéraux argileux du sol agissent comme des puits ou des sources de phosphore organique, en fonction de leurs propriétés, de leur énergie de liaison et de leur degré de saturation en phosphore.

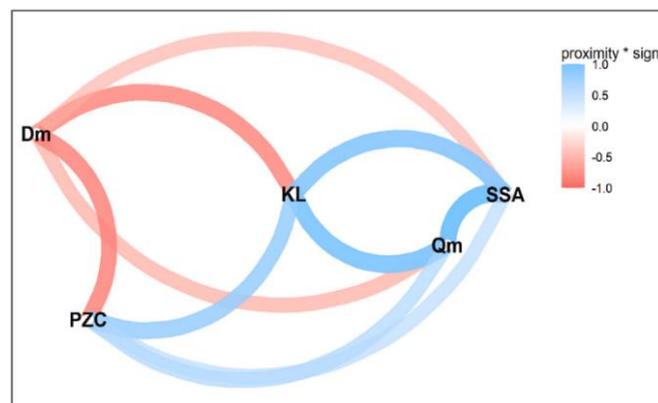


Figure 12. Schéma conceptuel montrant le lien entre les propriétés des minéraux du sol (PZC, SSA) et les paramètres d'adsorption/désorption (force de liaison, KL ; capacité d'adsorption, Qm, et capacité de désorption, Dm). Le lien est basé sur les relations entre différentes variables. La couleur de chaque ligne fait référence au degré de relation entre les variables (Amadou et al., 2022a).

Conséquences des interactions phosphore organique – minéraux du sol sur le prélèvement du phosphore par la plante

L'identification des facteurs gouvernant les interactions entre les formes de phosphore organique et les minéraux du sol ne constitue qu'une première étape dans la compréhension de la dynamique du phosphore organique au sein du système sol-plante. Il convient de la compléter par l'évaluation des conséquences de ces interactions sur la disponibilité et le prélèvement du phosphore par la plante. Contrairement au phosphore inorganique, les formes de phosphore organique ne peuvent pas être prélevées directement par les racines après leur désorption de la phase solide. Pour être utilisé par les plantes, le phosphore organique doit d'abord être minéralisé par des enzymes, les phosphatases, sécrétées par les racines ou les microorganismes du sol (Richardson and Simpson, 2011). Au moyen d'une expérimentation en RHIZOtest (Figure 13), nous avons démontré que le phosphore issu des formes organiques adsorbées sur les minéraux du sol pouvait être prélevé par les plantes (Figure 14) (Amadou et al., 2022b). En effet, indépendamment du type de minéral étudié, entre 3 et 18% du phosphore organique adsorbé sur les minéraux fut absorbé par le ray-grass (*Lolium multiflorum*) au cours de l'expérimentation.

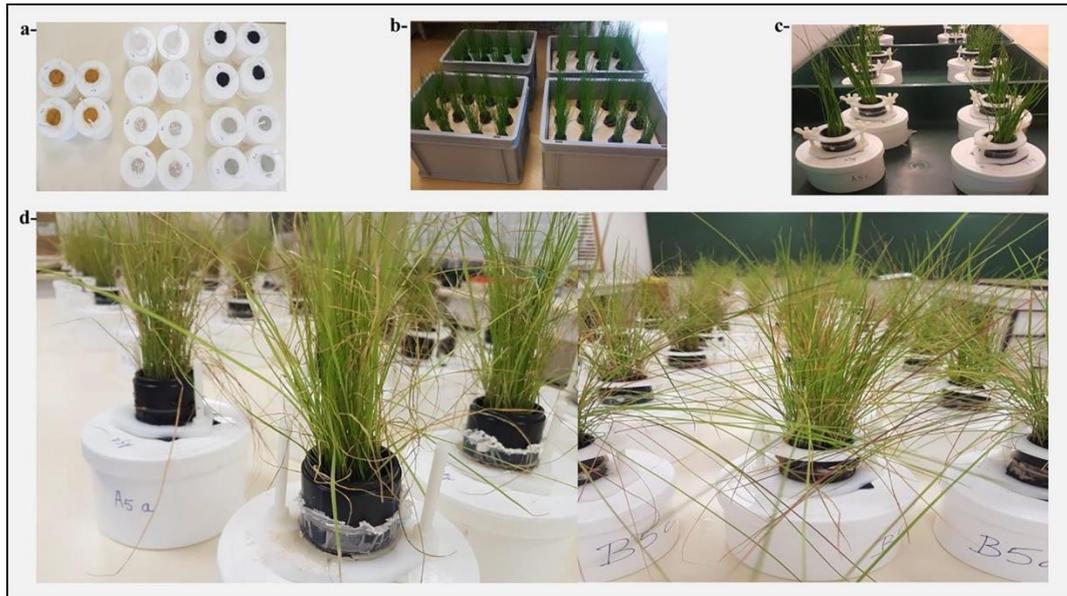


Figure 13. Illustration du dispositif expérimental (RHIZOtest) : (a) fine couche de sol constituée de quartz et d'un complexe minéral-phosphore, (b) période de préculture, (c) mise en contact entre la fine couche de sol et le tapis racinaire formé durant la période de préculture, (d) dispositifs à la fin de l'expérience.

Cette quantité de phosphore prélevé par la plante s'est avérée dépendre à la fois de la forme de phosphore et du type de minéraux présents dans la rhizosphère. A l'exception d'IHP qui a très peu contribué à la nutrition en phosphore de la plante lorsqu'il était adsorbé sur les oxydes de fer ou d'aluminium, les complexes minéraux-phosphore organique ont contribué au prélèvement de P dans l'ordre suivant : kaolinite-OP \ll gibbsite-OP \leq goethite OP \ll montmorillonite-OP. Au global, nous avons montré que, de manière surprenante, le prélèvement de phosphore issu des formes organiques adsorbées n'était pas lié à la force de liaison entre les constituants organiques et les minéraux. En revanche, il dépendait principalement de l'activité de la phosphatase au sein de la rhizosphère qui semble elle-même être influencée par la forme de phosphore organique présente (Figure 15). Plus intéressant encore, par rapport au phosphore inorganique, habituellement considéré comme étant la forme la plus disponible, l'étude a montré que le P issu de GLY pouvait être autant ou davantage prélevé par la plante lorsqu'il était adsorbé sur la goethite et la montmorillonite ou sur la gibbsite, respectivement. Ces résultats soulignent à leur tour le potentiel intéressant que représentent les formes de phosphore organique dans la nutrition en phosphore de la plante tout en mettant en avant la nécessité de considérer davantage les interactions entre les formes de phosphore organique et les constituants du sol afin d'optimiser au mieux la gestion de la fertilisation en fonction de la minéralogie du sol.

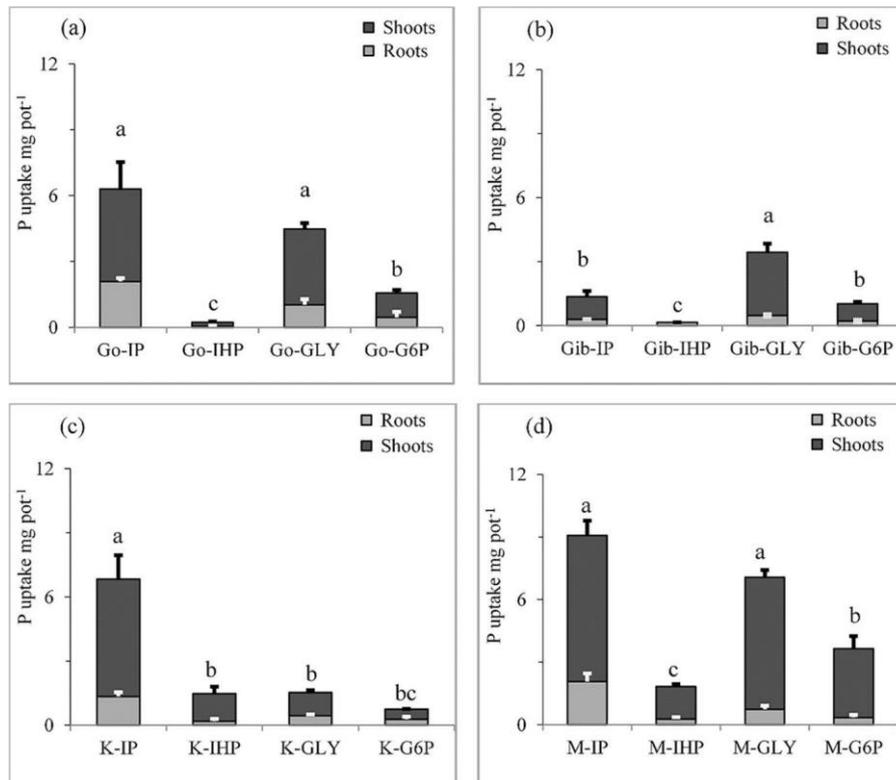


Figure 14. Absorption de phosphore par les parties souterraines et aériennes du ray-grass selon différentes sources de phosphore. Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes (test HSD de Tukey ; $P < 0.05$). Les barres d'erreur indiquent l'erreur standard. Minéraux des sols (Go : goethite, Gib : gibbsite, K : kaolinite et M : montmorillonite) ; Composés du phosphore (IHP : myo-inositol hexakisphosphate, GLY : glycérophosphate, G6P : glucose-6-phosphate et IP : KH_2PO_4) ;

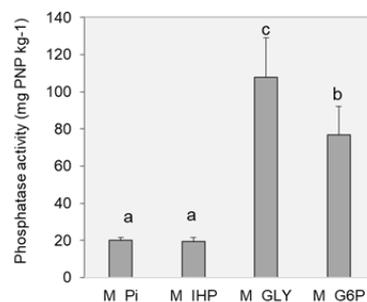


Figure 15. Activité de la phosphatase en fonction des formes de phosphore adsorbées (sur la montmorillonite dans cet exemple).

L'absorption de phosphore issu des formes de phosphore organique adsorbées sur les minéraux peut aussi être affectée par d'autres facteurs environnementaux. Nous avons ainsi montré que la dynamique du phosphore au sein du système sol-plante était fortement dépendante des interactions entre les formes d'azote (NO_3^- ou NH_4^+), les formes de phosphore et les minéraux du sol (Figure 16). Plus précisément, l'apport d'azote en présence de phosphore inorganique conduit à une situation de co-limitation de l'azote et du phosphore (indiquée par un ratio N :P entre 12 et 16) tandis qu'en présence de formes de phosphore organique, l'apport d'azote, peu importe sa forme, conduit toujours à une limitation en phosphore (N :P >16). Ce phénomène est par ailleurs davantage marqué pour les formes de phosphore organique adsorbées sur les oxydes de fer. En somme, si le type et la nature des sources de phosphore déterminent le degré de limitation des nutriments chez les plantes, ce dernier est aussi affecté par la fertilisation azotée et le type de minéraux constituant le sol. Ainsi, nos résultats indiquent (i) qu'il est possible de moduler le prélèvement de phosphore à partir de forme organique

en contrôlant la fertilisation azotée mais aussi (ii) que l'enrichissement en azote des écosystèmes, notamment d'origine anthropique (Galloway et al., 2008), peut impacter la limitation en phosphore dans les plantes dans une mesure dépendant de la minéralogie du sol, des formes de phosphore adsorbées et de la forme d'azote appliquée.

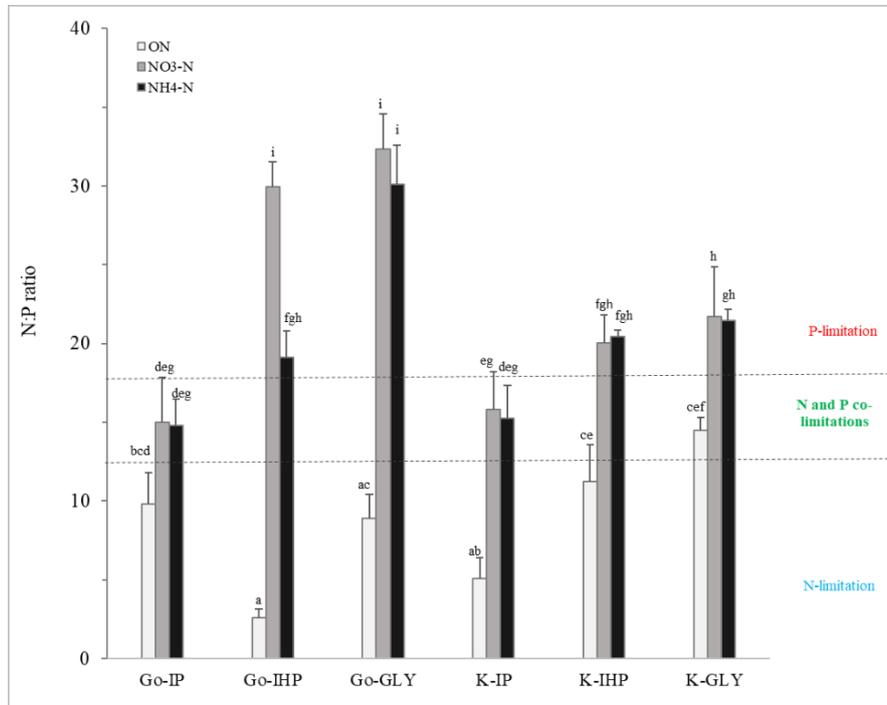


Figure 16. Ratio N:P dans le ray-grass cultivé sur des substrats enrichis en phosphore inorganique (IP) ou organique (IHP et GLY ; : myo-inositol hexakisphosphate et glycérophosphate, respectivement) adsorbé sur de la goethite (Go) ou de la kaolinite (K) sans azote (ON) ou en présence d'azote sous forme de nitrate (NO₃-N) ou d'ammonium (NH₄-N).

Stratégie d'acquisition et de mobilisation du phosphore par les plantes

Les résultats précédents nous ont permis de préciser les conséquences des interactions entre les formes de phosphore et les constituants du sol sur la disponibilité du phosphore. Cependant, afin d'optimiser la gestion de la fertilité en phosphore dans les sols, il est également indispensable d'affiner notre compréhension des stratégies mises en œuvre par les racines pour acquérir et mobiliser le phosphore. Ceci est d'autant plus vrai que, dans les systèmes fertilisés très productifs, il existe un écart important entre les exportations et les apports de phosphore, ce qui conduit à l'accumulation de phosphore organique et inorganique peu disponible dans le sol (Bouwman et al., 2017). Plusieurs études ont suggéré que, dans ces systèmes, il serait possible d'améliorer la disponibilité du phosphore en sélectionnant des stratégies et des traits végétaux qui permettent d'accéder au phosphore accumulé dans le sol (Menezes-Blackburn et al., 2018). En effet, les plantes ont développé une série de traits morphologiques, architecturaux et physiologiques qui leur permettent d'accéder aux divers pools de phosphore du sol. Les traits morphologiques tels que la longueur spécifique des racines (SRL) et les caractéristiques architecturales telles que la densité de la longueur racinaire (RLD) permettent aux plantes d'augmenter leur capacité d'exploration du phosphore (Ma et al., 2018; Pang et al., 2018). Alors que seul le phosphore inorganique en solution est absorbé par les plantes, les racines peuvent également mobiliser le phosphore inorganique et organique en sécrétant des protons (H⁺) pour

dissoudre les phosphates de calcium ou en libérant des carboxylates qui entrent en concurrence avec le phosphore pour les sites de liaison et diminuent ainsi sa sorption sur les surfaces minérales (Wang and Lambers, 2020). Les plantes peuvent également hydrolyser le phosphore organique en libérant des phosphatases acides (Richardson et al., 2011). A l'aide de quelques exemples, cette section traitera des recherches que j'ai conduites sur l'identification des stratégies et des traits fonctionnels des végétaux impliqués dans l'acquisition du phosphore. Il est à noter que, au sein d'UniLaSalle, l'étude des traits fonctionnels des végétaux et de leurs implications dans le fonctionnement des agroécosystèmes est principalement portée par mon collègue **Michel-Pierre Faucon**. Ces sujets ont donc été le plus souvent proposés à son initiative et j'ai eu le privilège d'y être associé en apportant mes compétences en science du sol et en biogéochimie.

3.1.4. L'identification des traits et des stratégies d'acquisition du phosphore au service de l'agroécologie : l'exemple des couverts intermédiaires

L'agriculture moderne est confrontée à de nombreux défis tels que la croissance de la population, l'épuisement des ressources minérales et le changement climatique et de nombreuses études soulignent aujourd'hui la nécessité de repenser et d'orienter les systèmes agricoles vers des systèmes plus durables (Altieri, 2018). L'«agroécologie», définie pour la première fois dans les années 1920 par un agronome américain d'origine russe, Basil Bentsin, comme une application du domaine de l'écologie aux systèmes agricoles (Wezel and Soldat, 2009), propose de répondre à ces enjeux majeurs par la mise en place de pratiques de gestion et d'amélioration des services écosystémiques permettant d'assurer une production garantissant la sécurité alimentaire tout en réduisant les externalités négatives et les impacts environnementaux (Tomich et al., 2011). Sans entrer dans les détails des diverses définitions et interprétations que les auteurs donnent à l'agroécologie ou à l'intensification écologique de l'agriculture, il est généralement admis que la mise en place de pratiques alternatives à l'agriculture conventionnelle repose sur l'utilisation de concepts et de principes écologiques pour la conception et la gestion de systèmes agricoles durables (Wezel et al., 2009).

Les impacts des pratiques agroécologiques sur les propriétés chimiques du sol et plus généralement sur la fertilité du sol sont de plus en plus documentés. L'incorporation de fabacées dans le système de culture pour bénéficier de leur capacité à favoriser la fixation de l'azote atmosphérique est l'une des pratiques les plus adoptées, que ce soit dans les rotations de cultures, en association ou dans les couverts intermédiaires (Ditzler et al., 2021; Voisin et al., 2014). D'autres pratiques se basent sur l'augmentation de la diversité spatiale ou temporelle des espèces végétales au sein du système de culture, faisant l'hypothèse que la fourniture des services écosystémiques par l'agroécosystème est positivement corrélée à la biodiversité qu'il abrite (Beillouin et al., 2021).

Les cultures intermédiaires sont des cultures implantées entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture suivante pendant une période plus ou moins longue appelée interculture. Ayant pour vocation de ne pas laisser le sol sans couverture végétale, elles peuvent fournir une série de services tels que la réduction de l'érosion, la fixation de l'azote atmosphérique ou encore l'augmentation du stockage du carbone dans les sols (Daryanto et al., 2018; Schipanski et al., 2014). La croissance de ces cultures est généralement interrompue mécaniquement, chimiquement ou naturellement par l'action du gel et les résidus sont laissés sur le sol où ils se décomposent. Depuis quelques années, l'idée d'utiliser les cultures intermédiaires pour favoriser le recyclage du phosphore dans les agroécosystèmes est de plus en plus avancée (Faucon et al., 2015; Hallama et al., 2019) (Figure 17). Les cultures intermédiaires peuvent accumuler une grande quantité de phosphore pendant leur période de croissance (Wendling et al., 2016) et le relibérer dans le sol lorsqu'elles se décomposent, jouant par là un rôle majeur dans le maintien et l'amélioration de la disponibilité du

phosphore (Damon et al., 2014). Cependant, la compréhension des processus par lesquels les cultures constitutives des couverts acquièrent et mobilisent le phosphore, notamment en fonction des facteurs environnementaux, est à ce jour insuffisamment documentée pour que l'on puisse concevoir des couverts végétaux optimisant la gestion du phosphore dans les agroécosystèmes.

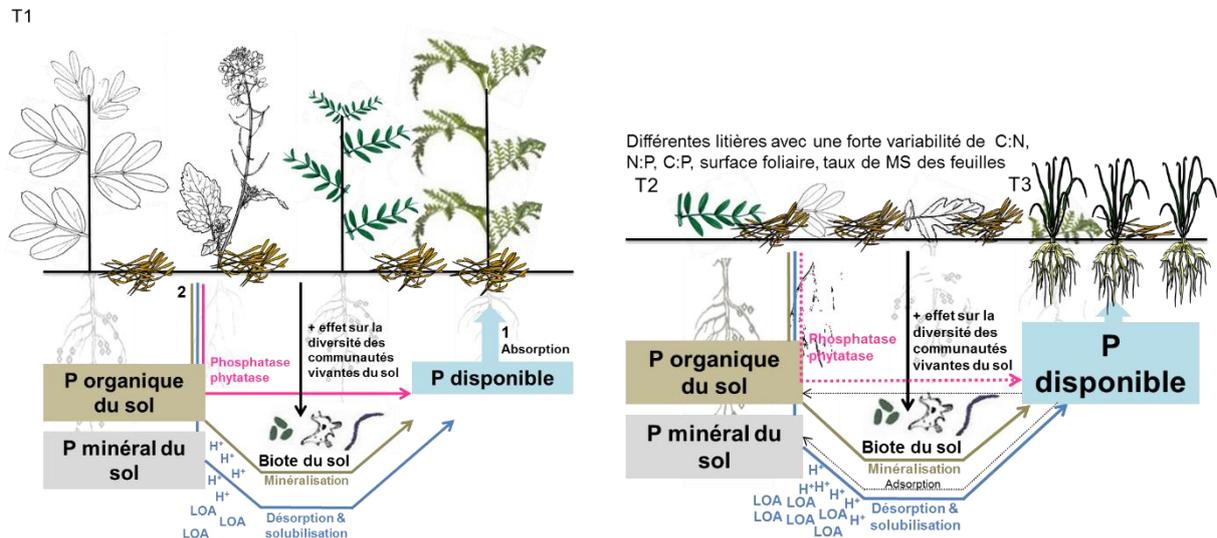


Figure 17. Feedback sol- plante positif d'un couvert végétal vis-à-vis d'une culture de blé tendre. Le couvert est composé de lentilles (*Lens culinaris*), féveroles (*Vicia faba*), moutardes blanches (*Sinapsis alba*) et phacélie à feuilles de tanaisie (*Phacelia tanacetifolia*) implantées dans un système semis direct. T1 : Relations entre la diversité fonctionnelle d'un couvert composé d'espèces de légumineuses et d'autres espèces présentant des traits morphologiques contrastés (racines, tiges, feuilles) et la disponibilité du P. T2 : Les résidus de culture (matière fraîche) et les traits chimiques du couvert influenceraient la disponibilité du P. T3 : l'hétérogénéité du mélange de résidus de culture se décomposant à la surface du sol présenterait une cinétique de décomposition synchronisée vis-à-vis des besoins en P de la culture. LOA= acide organique de faible poids moléculaire (d'après Faucon et al., 2015).

Tout est question de compromis...

Dans le cadre de la thèse de doctorat de **Nicolas Honvault** (thèse CIFRE financée par le groupe coopératif VIVESCIA) que j'ai co-dirigée avec **Michel-Pierre Faucon**, nous nous sommes intéressés aux couverts intermédiaires et, plus précisément, au rôle de leurs traits fonctionnels dans les processus gouvernant la disponibilité du phosphore dans les agroécosystèmes. L'objectif final était d'améliorer la conception des couverts intermédiaires afin de maximiser la disponibilité du phosphore pour la culture suivante. En caractérisant les traits morphologiques, architecturaux et physiologiques de 13 espèces constitutives des couverts intermédiaires, nous avons montré l'existence de « tradeoff » entre les traits morphologiques et physiologiques des racines pour l'acquisition du phosphore au sein des espèces végétales (Honvault et al., 2020). A titre d'exemple, on peut notamment citer l'existence d'une corrélation négative entre le pourcentage de racines fines et l'activité de la phosphomonoestérase (PME) ou l'acidification de la rhizosphère, ce qui suggère l'existence d'une balance coût/bénéfice entre les traits morphologiques et physiologiques. Cependant, nos résultats mettent également en évidence une différenciation des stratégies de mobilisation et d'acquisition du phosphore en fonction du type de sol dans lequel les couverts ont été cultivés (Figure 18).

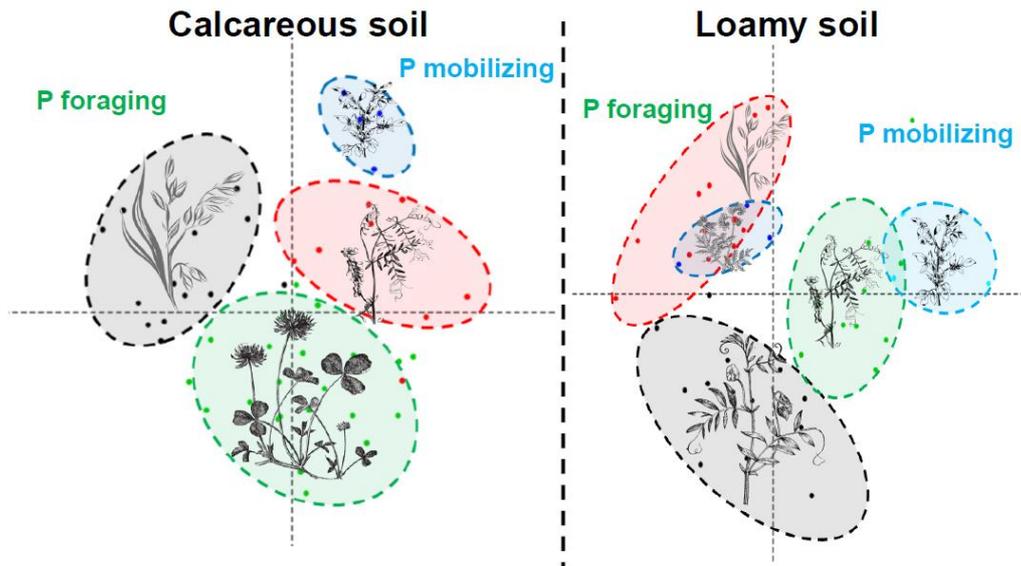


Figure 18. Résultat de l'analyse en composante principale démontrant l'existence de cluster au sein desquels sont regroupées des espèces présentant des stratégies d'acquisition et de mobilisation du phosphore différentes (Honvault et al., 2020).

... d'adaptation...

Les travaux conduits dans le cadre de la thèse d'**Issifou Amadou** se sont notamment attelés à identifier l'origine de cette différenciation en caractérisant le rôle des formes de phosphore et des constituants des sols sur la mise en place des stratégies d'acquisition et de mobilisation du phosphore par les plantes. En particulier, ils ont démontré que les plantes pouvaient ajuster leurs stratégies d'acquisition en fonction de la forme de phosphore et de sa disponibilité (régulée par les interactions avec les minéraux du sol). Ainsi, parmi les trois stratégies d'acquisition du phosphore, à savoir la mobilisation (« mining »), l'exploration (« foraging ») et les stratégies intermédiaires, les espèces ayant des stratégies de mobilisation et d'exploration ont fait preuve d'une grande plasticité, modifiant leurs traits pour s'adapter aux formes de phosphore organique ou inorganique (Figure 19). En revanche, les espèces ayant une stratégie intermédiaire ont démontré une plus faible plasticité et une absorption de phosphore similaire quelle que soit la forme de phosphore en présence. L'acquisition de phosphore à partir de formes de phosphore organique reste cependant plus faible que celle à partir de phosphore inorganique pour les espèces ayant une stratégie d'exploration, ce qui s'explique par la forte sorption du phosphore organique sur les minéraux qui réduit sa disponibilité. A l'inverse, les espèces ayant une stratégie de mobilisation ont surmonté ces contraintes et été capables d'accéder au phosphore issu des formes organiques, davantage même qu'au phosphore apporté sous forme inorganique.

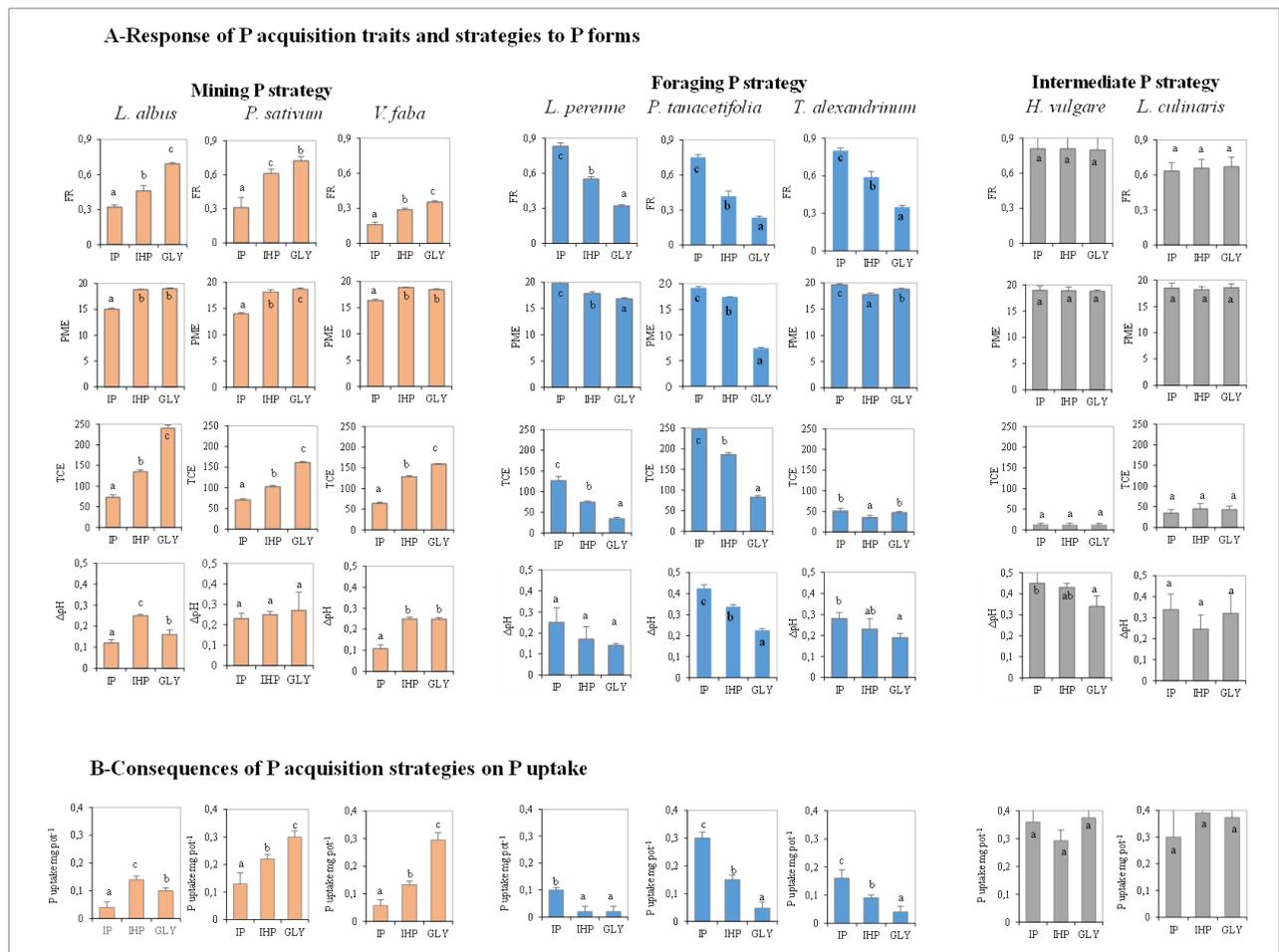


Figure 19. (A) Réponse des stratégies et des traits d'acquisition du phosphore aux différentes formes de phosphore (phosphore inorganique, IP ; myo-inositol hexakisphosphate, IHP ; glycérophosphate, GLY) adsorbées sur la goéthite et (B) conséquences sur le prélèvement de phosphore par la plante. FR pourcentage de racines fines (diamètre <0.5 mm, %), PME activité de la phosphomonoestérase (μg nitrophenol g^{-1} heure $^{-1}$), TCE taux de libération de carboxylates totaux (μmol g racine $^{-1}$ heure $^{-1}$), ΔpH variation de pH dans la rhizosphère (en valeur absolue).

Pris dans leur ensemble, ces résultats ajoutent une nouvelle brique à la compréhension des interactions entre les formes de phosphore, les constituants du sol et les traits racinaires. La mise en évidence d'une adaptation de certains traits à leur environnement ainsi que d'une meilleure acquisition de phosphore par les plantes selon leur stratégie et selon la forme de phosphore appliquée est un résultat important pour l'amélioration de l'utilisation de ressources organiques riches en phosphore mais aussi pour maximiser l'augmentation de la disponibilité en phosphore du sol selon la forme sous laquelle il est majoritairement présent. En matière d'implication concrète, la conception de couvert intermédiaire en vue d'améliorer la disponibilité en phosphore dans le sol pourrait par exemple se baser sur la meilleure adéquation entre les formes de phosphore présentes ou appliquées, la minéralogie du sol et les stratégies d'acquisition des plantes.

... et d'effets directs et indirects.

En plus du rôle direct que jouent les traits des végétaux dans la mobilisation du P, l'activité et la composition des communautés microbiennes du sol influencent également fortement l'acquisition du phosphore par les plantes (Smith and Smith, 2011). L'exemple le plus connu est celui des champignons

mycorhiziens à arbuscules (AMF) dont l'association avec les racines peut augmenter considérablement l'acquisition de phosphore par la plante (van der Heijden et al., 2008). Au-delà de cet exemple, plusieurs autres groupes microbiens tels que les bactéries solubilisatrices de phosphore ou les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (en anglais : PGPR, acronyme de Plant Growth Promoting Rhizobacteria) peuvent contribuer à l'absorption de phosphore en mobilisant le phosphore indisponible dans les sols ou en favorisant la croissance racinaire (Menezes-Blackburn et al., 2018; Richardson et al., 2011). La thèse de Nicolas Honvault a confirmé le rôle majeur joué par les communautés microbiennes du sol dans l'acquisition du phosphore par la plante (Honvault et al., 2021). A travers la caractérisation de différents traits fonctionnels et indicateurs microbiens, nous avons en effet montré que l'acquisition de phosphore par la plante est tout autant influencée par ses traits racinaires que par la structure des communautés microbiennes de sa rhizosphère (Figure 20).

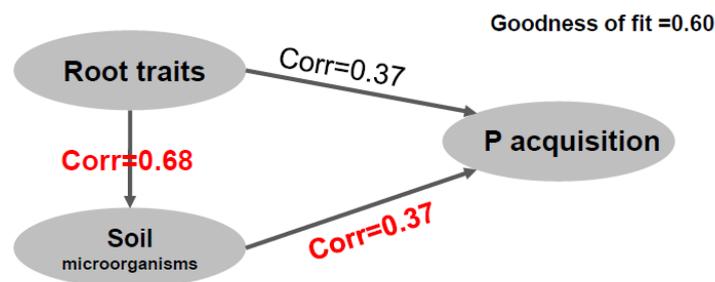


Figure 20. Résultats du modèle PLS expliquant l'acquisition du phosphore. Corr est le coefficient de corrélation entre les variables (d'après Honvault et al., 2021).

Plus important encore, l'analyse des corrélations entre les traits morphologiques et physiologiques des racines et les communautés fongiques et bactériennes de la rhizosphère a révélé que la quantité d'exsudats racinaires, et en particulier de malate et de malonate selon la nature du sol, est fortement liée à l'abondance de bactéries Gram-négatives, elles-mêmes corrélées positivement à la concentration en phosphore disponible dans la rhizosphère et à la teneur en P de la plante. De manière générale, nos résultats indiquent que l'exsudation racinaire de carboxylates joue un rôle important dans la modulation des interactions plantes-sol-microbes impliquées dans l'acquisition de phosphore et qu'il est probable que la libération de ces exsudats par la plante favorise l'acquisition de phosphore non seulement à travers leurs effets directs sur la solubilisation du phosphore mais aussi en favorisant certaines communautés microbiennes solubilisatrices de phosphore.

Ces résultats démontrent qu'à travers une caractérisation holistique des mécanismes impliqués dans la mobilisation et l'acquisition du phosphore par les racines, il serait possible, en fonction de la forme de phosphore et du type de sol, de sélectionner des espèces végétales présentant des stratégies complémentaires pour concevoir des couverts multi-espèces permettant d'améliorer l'acquisition du phosphore tout en réduisant la concurrence pour les ressources.

3.1.5. L'identification des traits et des stratégies d'acquisition du phosphore : une solution pour optimiser la fertilisation des systèmes de cultures

Les recherches que nous avons conduites sur les traits et les stratégies d'acquisition et de mobilisation du phosphore ne s'appliquent pas uniquement aux couverts intermédiaires. En effet, si, par rapport aux cultures intermédiaires, l'agriculteur a moins de flexibilité pour diversifier ses cultures principales, la compréhension des stratégies d'acquisition et de mobilisation du phosphore par ces cultures peut en revanche être particulièrement utile pour optimiser l'apport de fertilisants dans la rotation. C'est notamment ce que nous avons étudié dans le cadre de la thèse d'**Etienne Michel** dont l'objectif était d'évaluer les facteurs gouvernant le potentiel fertilisant de différentes boues de station d'épuration

(projet STEPHOR). Cette thèse, financée par SEDE Environnement en collaboration avec le SIAAP (Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne), co-encadrée par Michel-Pierre Faucon et moi-même et conduite pour certaines parties en collaboration avec l'équipe **d'Ellen Kandeler** (Université d'Hohenheim, Allemagne) a malheureusement été arrêtée par le doctorant après deux années pour des raisons personnelles. Les expérimentations ont néanmoins été poursuivies et les objectifs scientifiques atteints grâce à l'embauche de **Cécile Nobile** en tant que postdoctorante sur le projet.

Nos travaux ont démontré que certaines boues peuvent être aussi efficaces que les fertilisants minéraux pour augmenter la disponibilité en phosphore dans le sol, en particulier les boues présentant une concentration élevée en phosphore, dont l'application stimule l'activité de la phosphatase dans le sol (voir schéma synthétisant les résultats à la Figure 21) (Houben et al., 2019). De plus, nos travaux ont permis d'identifier la réponse des stratégies d'acquisition des cultures d'une rotation colza-blé-orge typique du Nord de la France à un apport de boue de station d'épuration (Nobile et al., 2019). A travers la compréhension de cette réponse, l'objectif opérationnel final était de déterminer à quel moment de la rotation il était préférable d'apporter la boue au sol.

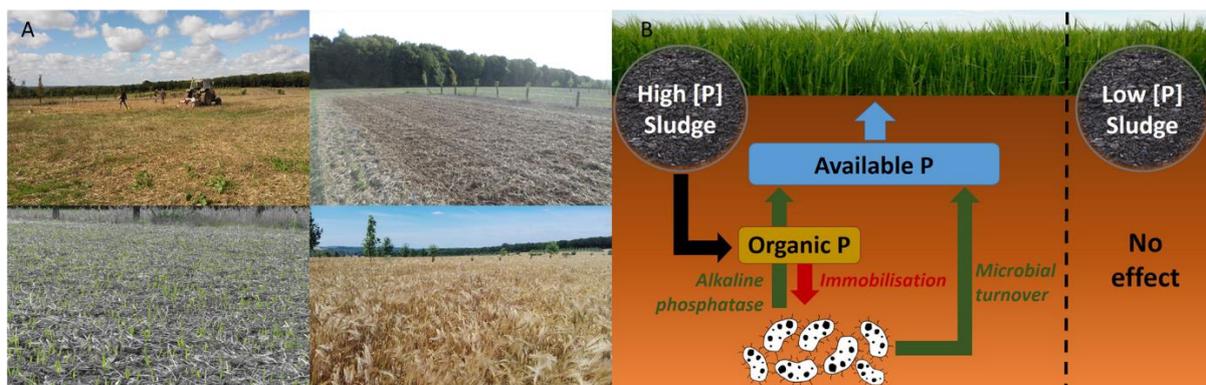


Figure 21. (A). Dispositif expérimental ayant permis de mettre en évidence (B) l'impact de l'application de boues sur la disponibilité en phosphore : les boues riches en phosphore augmentent directement et indirectement la disponibilité du phosphore tandis que les boues pauvres en phosphore n'ont pas d'effet (Houben et al., 2019).

Comme nous nous y attendions, nos résultats ont montré que la stratégie d'acquisition du phosphore diffère d'une culture à l'autre. Par rapport au colza, le blé et l'orge présentaient une longueur spécifique de racine plus élevée ainsi qu'une plus grande libération de carboxylates, ce qui leur a permis d'extraire autant de phosphore en présence de boue qu'en présence de fertilisant minéral (Figure 22). Cependant, le résultat le plus remarquable concerne le colza. En effet, sa stratégie de mobilisation du phosphore s'est exprimée par une plus grande libération de phosphatases acides par les racines, ce qui s'est traduit par un accroissement de la minéralisation du phosphore organique issu des boues et, probablement, de la matière organique du sol. Grâce à cette minéralisation accrue du phosphore organique, les parties aériennes du colza ont présenté, au final, de plus grandes teneurs en phosphore en présence de boue qu'en présence de fertilisants minéraux. En résumé, la compréhension des différences d'efficacité des stratégies d'acquisition du phosphore entre le colza, le blé et l'orge peut constituer une aide précieuse pour optimiser l'application de ressources phosphatées organiques au sein de la rotation. Dans ce cas-ci, compte tenu de sa stratégie plus efficace pour prélever le phosphore des sols fertilisés avec les boues d'épuration, le colza devrait être la culture de la rotation pour laquelle les apports de phosphore organique sont à privilégier. En revanche, avec leur longueur racinaire spécifique et leur importante libération de carboxylate, l'orge et le blé pourraient être davantage efficaces pour mobiliser le phosphore dans les sols ayant une capacité élevée

d'adsorption du phosphore. De manière plus générale, nos résultats renforcent l'idée que l'optimisation de l'utilisation de ressources phosphatées alternatives aux fertilisants classiques doit tenir compte de l'adéquation entre les stratégies d'acquisition du phosphore des cultures et la composition en phosphore du fertilisant.

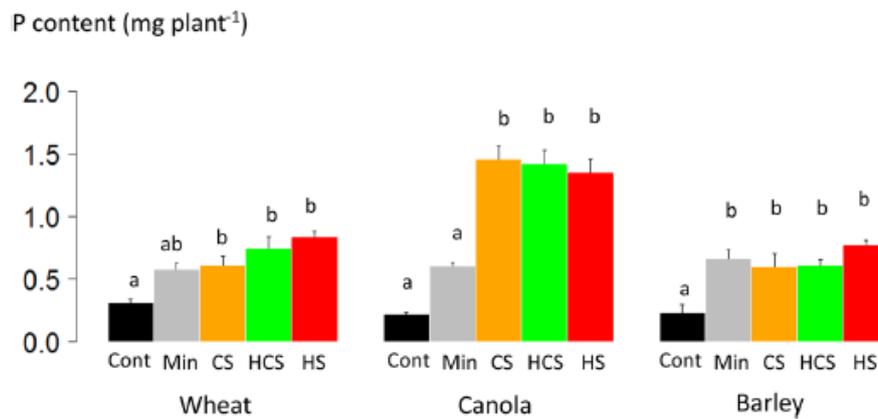


Figure 22. Concentration en phosphore dans la plante en fonction des différents traitements. Cont : contrôle, Min : traitement minéral, CS : boue compostée, HS : boue traitée thermiquement, HCS : boue traitée thermiquement et compostée (Nobile et al., 2019).

3.2. Utilisation d'amendements innovants issus de co-produits industriels ou agricoles

3.2.1. Contexte

Les différents travaux que j'ai conduits depuis le début de ma thèse m'ont amené à travailler sur plusieurs types d'amendement, que ce soit dans le cadre de stratégies de remédiation des sols ou de l'amélioration du fonctionnement des sols agricoles. Comme mentionné précédemment, au cours d'un projet de recherche en partenariat avec SEDE environnement, j'ai étudié le potentiel d'utilisation des boues de station d'épuration comme intrant phosphaté dans les agroécosystèmes. Dans le cadre des projets RESIAR et AD'Metha (réseau de sites démonstrateurs de la bioéconomie), je me suis également intéressé à l'impact des digestats de méthanisation sur le fonctionnement du sol et de l'agroécosystème. Ces recherches, principalement conduites à travers des projets étudiants ont conduit à la publication de deux articles. Le premier met en évidence le rôle conjoint que peuvent jouer l'apport de digestat et la mise en place de systèmes de production en rupture sur l'activité microbienne et la structure de la faune du sol en fonction du travail du sol (Denier et al., 2022). Le second évalue les performances agronomiques et environnementales de l'adoption de telles pratiques et techniques de culture (Kervroëdan et al., 2022).

A la suite de collaborations avec des entreprises spécialisées dans l'élevage d'insectes (Ynsect et Innovafeed), j'ai également étudié le potentiel d'utilisation des déjections d'insectes (appelées frass) en tant que fertilisant. Ces recherches ont notamment démontré que le frass de *Tenebrio molitor* peut être aussi efficace que des fertilisants minéraux en matière de production de biomasse et de nutrition NPK de la plante, notamment en raison de sa minéralisation rapide ainsi que de ses effets positifs sur l'activité microbienne du sol (Houben et al., 2021, 2020), ces effets bénéfiques étant même renforcés par la présence de verre de terre (Dulaurent et al., 2020). Au-delà de leur portée scientifique, ces études ont eu de réels impacts pour la société puisqu'elles ont contribué à l'obtention de

l'homologation et de l'autorisation de mise sur le marché du frass par la société Ynsect. Afin de promouvoir la diffusion de résultats évaluant l'utilisation potentielle du frass pour améliorer le fonctionnement des sols, j'ai par ailleurs co-édité un « Special Issue » sur le sujet dans la revue *Frontiers in Sustainable Food Systems* avec **Florian Wichern** et **Connor Watson** de la Rhine-Waal University of Applied Sciences (Allemagne) (Watson et al., 2022).

Dans cette partie, j'ai cependant décidé de m'atteler à faire le bilan des recherches que j'ai menées sur le biochar. Le biochar occupe en effet une grande partie de mes activités de recherche et il me semble pertinent que je l'utilise comme modèle d'étude pour illustrer le positionnement plus général de mes approches et objectifs scientifiques ainsi que les réflexions qui les animent.

3.2.2. Qu'est-ce que le biochar ?

Le biochar est le produit solide de la décomposition thermique de matières organiques (du bois mais aussi des résidus de culture, des déchets agroalimentaires, du fumier, etc.) sous un apport limité d'oxygène (O_2) et à relativement faible température (de l'ordre de 300 à 700 °C). Ce processus thermochimique est appelé carbonisation ou encore pyrolyse. Selon la définition retenue par l'International Biochar Initiative, le biochar se distingue du charbon de bois par le fait qu'il est produit dans l'intention d'être utilisé à des fins agronomiques ou environnementales. Le biochar présente une teneur élevée en formes de carbone organique dites aromatiques cycliques condensées. Ces structures se forment lors de la pyrolyse et gouvernent de nombreuses propriétés clés du biochar, notamment sa vitesse de minéralisation et sa capacité à retenir les éléments nutritifs. Si les propriétés chimiques des biochars sont généralement fondamentalement différentes de celles du matériau à partir duquel il a été produit, leurs caractéristiques macromorphologiques sont en revanche souvent similaires (Figure 23), ce qui signifie qu'ils ont globalement le même aspect, à l'exception de la couleur, noire pour le biochar (Houben, 2022).

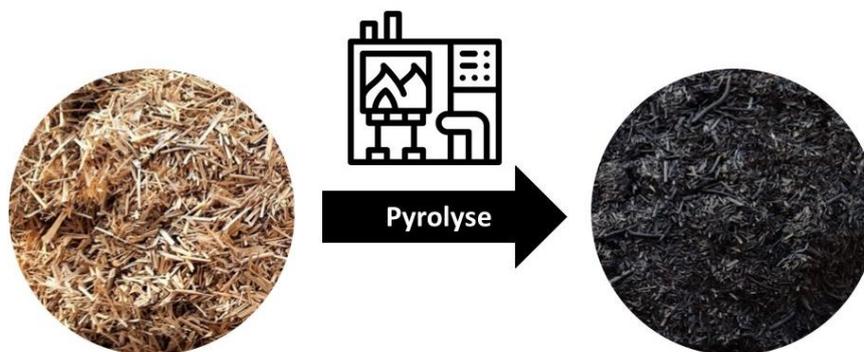


Figure 23. Comparaison de l'aspect de la matière première avant et après pyrolyse (à gauche et à droite, respectivement) (Houben, 2022).

L'utilisation du biochar comme amendement pour les sols exige par ailleurs qu'il ne contienne pas de composés toxiques (éléments traces métalliques, contaminants organiques, etc.). En dépit de ces caractéristiques communes à tous les biochars (présence de structures aromatiques condensées, absence de contaminants, etc.), il serait erroné de conclure que le biochar est un matériau étroitement défini. En effet, selon le procédé et la matière première utilisés pour le produire, le biochar peut présenter des propriétés très contrastées. En conséquence, il est important d'éviter les généralisations abusives liées à l'utilisation du biochar, les effets de l'un pouvant être très différents de ceux d'un autre. Si la plupart des communications discutent habituellement du biochar, leur pluralité doit nous

forcer à garder en tête qu'il n'existe pas un mais des biochars et que leurs effets peuvent être diamétralement opposés.

3.2.3. Les origines du biochar

Depuis une quinzaine d'années, l'utilisation du biochar comme amendement pour les sols a fait l'objet de très nombreuses études, les scientifiques lui portant un intérêt croissant pour ses potentielles capacités à atténuer le changement climatique tout en améliorant la fertilité des sols et en renforçant la production végétale. Toutefois, l'idée d'ajouter du biochar dans les sols afin d'augmenter leur fertilité n'est pas nouvelle. Au milieu du XIXe siècle par exemple, suite à l'observation de meilleurs rendements sur d'anciens sites de stockage de charbons, l'application de charbon de bois était recommandée dans certains manuels agricoles et revues scientifiques (Lemhann and Joseph, 2015). Les travaux de Justus von Liebig iront même jusqu'à poser les fondements théoriques de l'efficacité du charbon de bois pour améliorer la disponibilité des nutriments dans les sols (Von Liebig, 1878). Malgré les rares traces écrites, il semble que l'intérêt pour le charbon de bois comme amendement pour les sols se soit sporadiquement poursuivi durant les décennies qui suivirent pour finalement quasi disparaître au milieu du XXe siècle, probablement en raison du développement et à la commercialisation des engrais inorganiques.

Ces dernières années, le regain d'intérêt pour le charbon de bois et le biochar fut principalement motivé par la redécouverte de la Terra Preta de Indio (Glaser et al., 2001). Ces Terres Noires (Terra Preta en portugais) sont nées de l'enfouissement répété du charbon de bois des feux de cuisson, des déchets domestiques, d'os ou encore de fragments de poterie par les populations amérindiennes et, bien qu'elles datent de plusieurs centaines voire milliers d'années, elles ont conservé une fertilité remarquable au regard de celle des sols adjacents souvent très pauvres (Lehmann, 2009; Schmidt et al., 2023). La fertilité exceptionnelle de ces sols s'explique en partie par leur contenu élevé en matières organiques de type charbon, similaires au biochar (Novotny et al., 2009). Mais ce n'est pas tout ! En plus de mettre en lumière l'extraordinaire potentiel que pourrait représenter le biochar pour améliorer la fertilité des sols tropicaux, les recherches sur la Terra Preta ont révélé un autre secret : le fait d'y observer encore aujourd'hui des fragments de charbon enfouis à l'époque précolombienne atteste de l'incroyable stabilité de ce matériau dans le temps. En d'autres termes, cela signifie que la pyrolyse permet de convertir des biomasses facilement dégradables en matériaux qui ne le sont quasiment pas. Compte tenu des enjeux climatiques actuels, cette résistance du charbon et, par extension, du biochar à la dégradation s'avère tout à fait intéressante. En effet, alors que le carbone capté par les plantes à travers la photosynthèse est habituellement restitué à l'atmosphère lorsque la plante se décompose naturellement, la production de biochar à partir de résidus végétaux permettrait de limiter cette restitution, le carbone précédemment fixé par les plantes devenant non dégradable une fois pyrolysé (Lehmann, 2007).

À la suite des recherches et découvertes sur la Terra Preta, l'idée d'ajouter délibérément du biochar dans les sols tropicaux pour améliorer leur fertilité a de plus en plus été creusée (Novotny et al., 2009). Et c'est ainsi que, progressivement, les recherches ont démontré que le biochar pouvait considérablement améliorer les propriétés du sol et la productivité des cultures en contexte tropical, son ajout augmentant la disponibilité des nutriments, favorisant l'activité microbienne et diminuant la toxicité aluminique des sols en augmentant leur pH tout en y stockant du carbone (Amoakwah et al., 2022; Deal et al., 2012; Jeffery et al., 2017; Shetty et al., 2021). En régions tempérées, les sols présentent souvent moins de contraintes et les enjeux de sécurité alimentaire y sont moindres. Cela explique pourquoi les recherches n'y sont qu'à leurs balbutiements. Il n'en demeure pas moins que, comme je le détaillerai par la suite, même si l'effet positif du biochar sur la productivité des cultures

n'y est pas systématiquement observé, son apport permet de stocker du carbone et, potentiellement, d'améliorer le fonctionnement biologique du sol tout en limitant l'apport de fertilisants de synthèse (Atkinson et al., 2010; Jeffery et al., 2017).

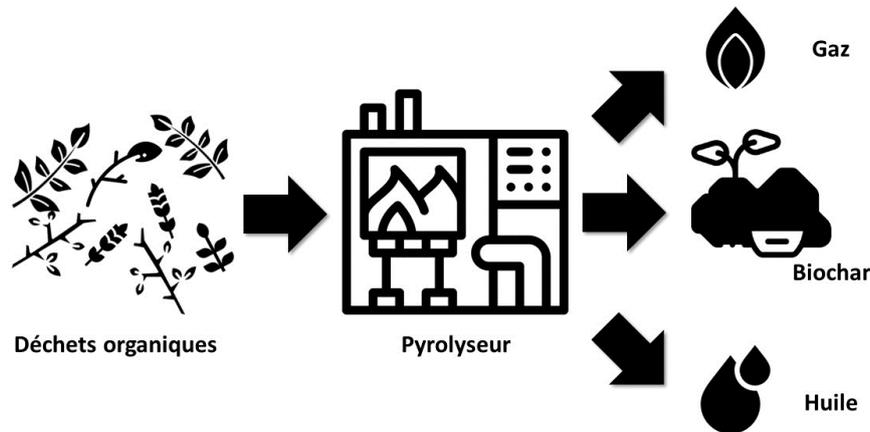


Figure 24. La pyrolyse convertit des déchets organiques en gaz, huile et biochar (Houben, 2022).

La capacité du biochar à améliorer le fonctionnement des sols et à y séquestrer du carbone n'est cependant pas la seule raison qui explique l'intérêt qui lui est porté. En effet, sa production en elle-même peut fournir différents avantages. Premièrement, la pyrolyse permet de valoriser des biomasses *a priori* à faible valeur ajoutée telles que des résidus forestiers, des sous-produits agroalimentaires, des refus de compostage, des déchets de scierie, etc. Deuxièmement, ce procédé génère de l'énergie. Le biochar n'est en effet pas le seul produit issu de la pyrolyse : celle-ci génère également, selon des proportions qui dépendent du procédé et de la matière première, de l'huile (bio-huile) et du gaz (syngaz) qui peuvent tous deux être utilisés à des fins énergétiques (Ahmed and Gupta, 2010; Park et al., 2008) (Figure 24). Il est d'ailleurs important de rappeler que la pyrolyse fut initialement développée et mise au point pour produire de l'énergie à partir de biomasses résiduelles, le biochar étant alors considéré comme un déchet dont il fallait minimiser la production (Zaman et al., 2017). Ce n'est que depuis une dizaine d'années que le paradigme a changé, le biochar issu de la pyrolyse n'étant non seulement plus considéré comme un déchet mais devenant, au contraire, un objectif de production. Si mes recherches se sont principalement focalisées sur l'utilisation du biochar dans les sols, il convient toutefois de rappeler que le biochar peut aussi faire l'objet de nombreuses autres applications, notamment en métallurgie, dans les matériaux de construction, en catalyse, ... (Figure 25) (Abdeljaoued et al., 2020).

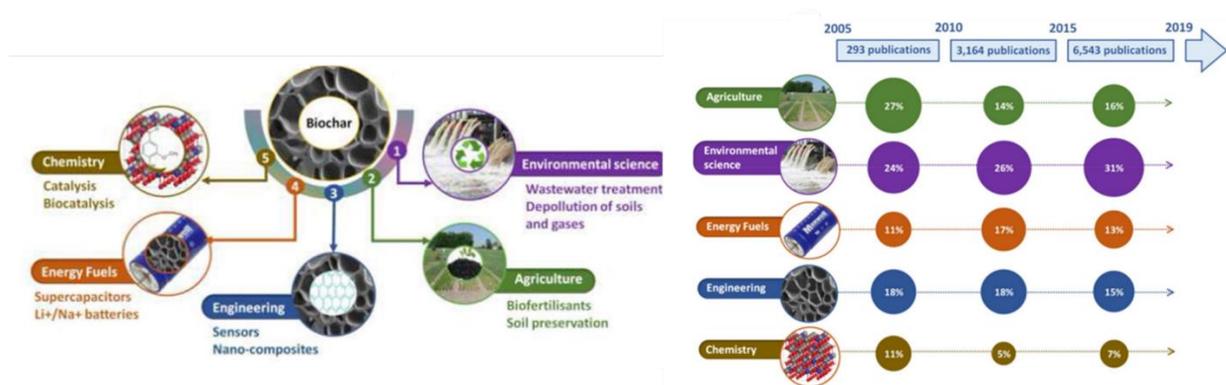


Figure 25. Illustration des différents usages du biochar et répartition de ces usages au sein de la littérature scientifique entre 2005 et 2010, entre 2010 et 2015 et entre 2015 et 2019. D'après Abdeljaoued et al. (2020).

3.2.4. Utilisation du biochar dans les sols contaminés

Le biochar s'est invité dans mes recherches lors de ma thèse de doctorat, en 2010. Tandis que j'étudiais le potentiel de déchets ou de co-produits industriels comme amendements pour refunctionaliser les sols contaminés, plusieurs travaux faisant état de l'intérêt du biochar dans la lutte contre le changement climatique et l'amélioration de la fertilité des sols commençaient à émerger au sein de la communauté scientifique (Sohi et al., 2010). D'autres études, moins nombreuses encore, proposaient d'utiliser le biochar pour d'autres fonctions, notamment en traitement des eaux et des sols (Hartley et al., 2009; Uchimiya et al., 2010). Séduit par les propriétés prometteuses de ce nouveau matériau, je décidais donc de l'intégrer parmi les différents amendements que je testais, faisant l'hypothèse que le biochar pourrait non seulement contribuer à l'immobilisation des métaux dans les sols mais aussi favoriser la recolonisation végétale et, plus largement, la refunctionalisation du sol et la fourniture de nouveaux services écosystémiques grâce à sa haute teneur en carbone stable (séquestration de carbone), sa porosité élevée (rétention d'eau, habitats pour les organismes du sol, rétention des éléments nutritifs) et sa concentration relativement élevée en éléments nutritifs (augmentation de la fertilité des sols). Compte tenu de l'intérêt scientifique croissant pour le biochar ainsi que des résultats encourageants générés par mes recherches, l'utilisation du biochar comme amendement pour les sols contaminés finit par devenir le sujet principal de la dernière moitié de ma thèse, conduisant à trois publications principales (Houben et al., 2013a, 2013b; Houben and Sonnet, 2015) dont l'une est aujourd'hui référencée comme « Highly cited paper » (Houben et al., 2013b).

A mon arrivée à UniLaSalle Beauvais, j'ai cherché à poursuivre mes recherches sur le biochar comme amendement pour les sols contaminés, notamment en intégrant un consortium (pilote par **Gerhard Soja**, AIT Austrian Institute of Technology) issu de la COST Action Biochar pour la mise en œuvre d'un essai inter-laboratoire destiné à comparer l'effet de différents biochars sur la disponibilité et le prélèvement de métaux par les plantes cultivées sur des sols contaminés contrastés. Avec mon collègue **Olivier Pourret**, géochimiste spécialiste des terres rares, nous avons également développé une nouvelle méthode basée sur l'utilisation des signatures d'adsorption des terres rares pour analyser la réactivité de surface des biochars, notamment vis-à-vis de leurs propriétés d'adsorption des métaux (Pourret and Houben, 2018). Cette méthode est complémentaire aux approches classiques de caractérisation de l'état de surface des biochars, telle que la spectroscopie par transformée de Fourier (FTIR), car elle permet de prendre en compte la contribution des groupes fonctionnels de surface dans l'adsorption des métaux en fonction des conditions du milieu (pH et force ionique). Son utilisation nous a notamment permis de démontrer que les biochars présentent la même dynamique d'adsorption que les substances humiques et que les groupes carboxyliques sont les principaux contributeurs de l'adsorption des métaux à la surface des biochars. Ces résultats ont donc fourni de nouveaux éléments de compréhension des paramètres gouvernant la rétention des métaux par le biochar tout en mettant en évidence que la plupart des mécanismes de rétention sont probablement réversibles car ils mettent en jeu des sites de faible affinité, confirmant l'une des hypothèses que j'avais soulevée à l'issue de ma thèse.

3.2.5. Utilisation du biochar en agriculture

Les principales recherches sur le biochar que j'ai pu conduire à Beauvais n'ont cependant pas concerné ses effets sur les métaux et son utilisation dans les sols contaminés. En effet, compte tenu de la nature de mes enseignements et de mon intégration dans une équipe davantage tournée vers la gestion des agroécosystèmes, j'ai également réorienté mes travaux sur le biochar en considérant principalement son utilisation dans les systèmes cultivés.

Le développement de mes recherches sur l'utilisation du biochar en agriculture a pu être rendu possible en grande partie grâce au projet **FUI Biochar 2021** (2017 – 2022). Ce projet a non seulement permis la réalisation de toute une série d'expérimentations apportant de nombreuses réponses vis-à-vis de l'utilisation du biochar en contexte tempéré mais il a également constitué l'amarce d'autres projets. Parmi ces derniers, je citerai en particulier le projet **Interreg Three-C** (2019 – 2023), visant le développement et l'introduction de chaînes de valeur économiquement viables basées sur les matières premières du charbon de bois provenant de la biomasse résiduelle dans l'Europe du Nord-Ouest, le projet **ADEME Graine Rapetorr** (2023 – 2026) destiné à développer une filière innovante d'amendement, de fertilisation et de stockage du carbone dans les sols à destination des agriculteurs à partir de paille de colza torréfiée, ainsi que différents projets de prestation et de recherche industrielle ambitionnant d'identifier les doses de biochar optimales pour le fonctionnement des agrosystèmes (prestation avec **ETIA** ; 2021 - 2024) ou de préciser le potentiel de développement et d'utilisation du biochar dans les supports de culture (prestation avec **EDF** ; 2022 - 2024).

Les autres projets étant en cours ou ayant généré des résultats non exploités à ce jour, j'illustrerai mes travaux sur l'utilisation du biochar en agriculture essentiellement au travers de certains résultats issus du projet FUI Biochar 2021. Ce dernier avait pour ambition de démontrer la faisabilité technico-économique d'une filière nationale de fabrication d'amendements et de supports de culture à forte valeur agronomique intégrant des biochars et associant les capacités techniques et de savoir-faire des plateformes de compostage. Au sein de ce projet, piloté par l'entreprise ETIA et intégrant l'Association des Agriculteurs Composteurs de France, différentes plateformes de compostage, le CNRS et l'INRAE, j'avais la responsabilité de coordonner les essais scientifiques permettant de valider l'efficacité agronomique des formules composées de biochar et de compost. Pour mener à bien ces essais, j'ai supervisé deux postdoctorants, **Cécile Nobile** et **Nicolas Honvault**, et co-supervisé avec **Cornelia Rumpel** (CNRS) deux autres postdoctorantes, **Manhattan Lebrun** et **Charlotte Védère**.

Quel est l'intérêt du biochar pour les sols agricoles en contexte tempéré ?

Si de nombreuses études reportent des effets bénéfiques du biochar sur la productivité des cultures et la fertilité des sols, la majorité de celles-ci ont été réalisées en contexte tropical. En contexte tempéré, les études sont moins nombreuses, en particulier en France (Zhang et al., 2016), et les effets plus nuancés. La méta-analyse réalisée par Jeffery et al. (2017) met par exemple en évidence une augmentation moyenne des rendements de 25% après apport de biochar dans les sols tropicaux alors qu'aucun effet n'est observé dans les sols des climats tempérés (Figure 26), concluant que l'utilisation de biochar en zone tempérée devrait davantage viser à améliorer la fourniture d'autres services écosystémiques par les agrosystèmes plutôt que d'ambitionner d'augmenter les rendements. Dans le cadre du projet FUI Biochar 2021, nous avons cherché à déterminer si l'utilisation combinée de biochar et de compost pouvait être bénéfique pour les sols et les cultures en zone tempérée.

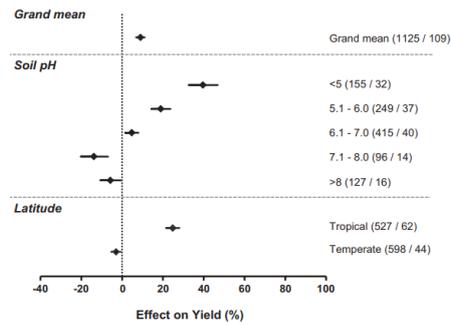


Figure 26. Réponse des rendements à l'apport de biochar en fonction du pH du sol ou de la latitude (d'après Jeffery et al., 2017).

Les résultats générés par la mise en place d'un dispositif unique en France consistant en une expérimentation *in situ* implantée sur trois sites différents (Beauvais dans l'Oise, Heugnes dans l'Indre et Largitzen dans le Haut-Rhin ; Figure 27) ont démontré que, à court terme, les mélanges biochar-compost (i) n'augmentent pas les rendements (maïs puis blé), (ii) peuvent être aussi efficaces que les engrais minéraux pour fournir le potassium et le phosphore aux cultures et (iii) peuvent, dans certains cas, augmenter significativement les concentrations de carbone organique du sol (Figure 28 et 29) (Nobile et al., 2022).

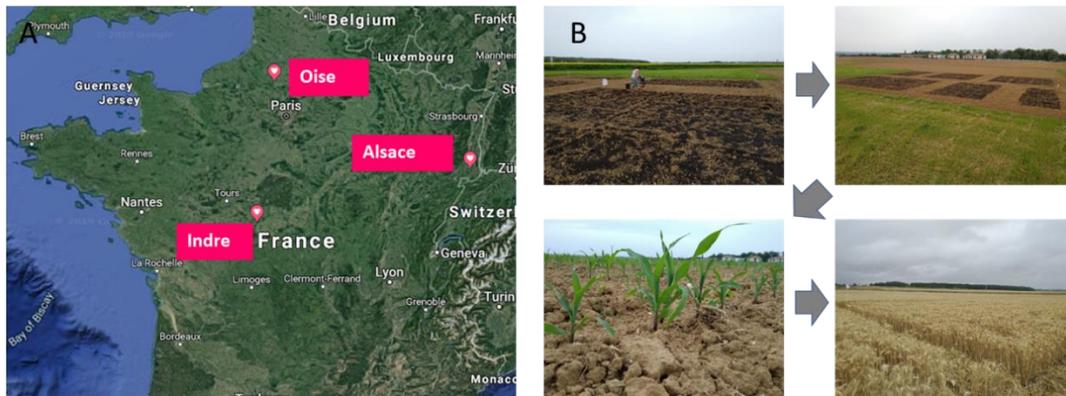


Figure 27. (A) Localisation des sites d'étude où ont été mis en place (B) des dispositifs expérimentaux sur lesquels ont été cultivés du maïs puis du blé en présence de compost et de biochar (Nobile et al., 2022).

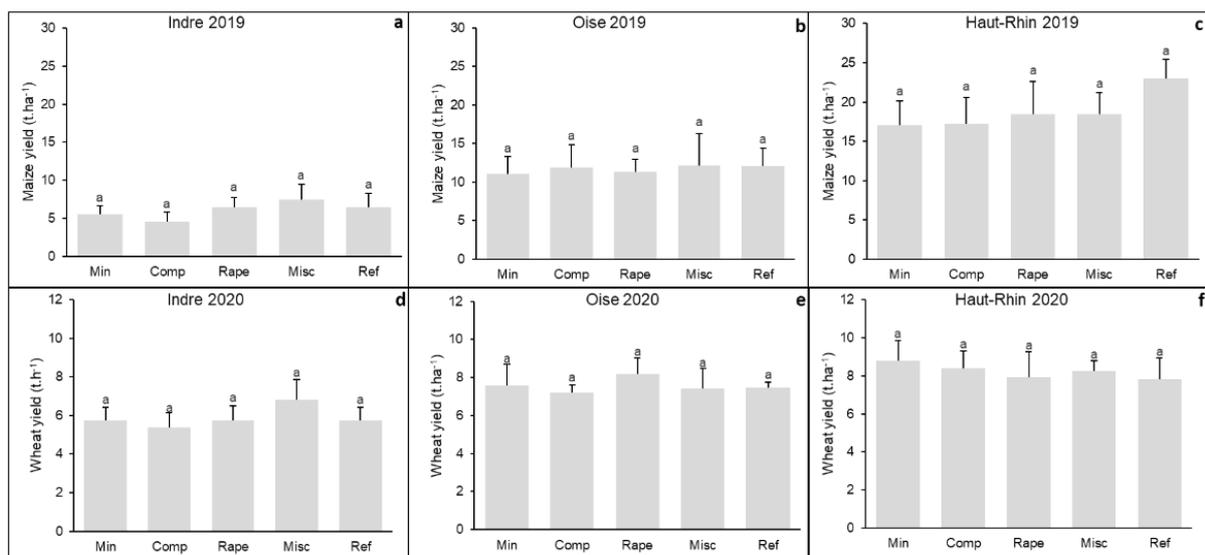


Figure 28. Rendements en maïs (2019) et en blé (2020) sur les trois sites (Indre, Oise et Haut-Rhin) en fonction des différents traitements : Min = traitement minéral PK, Comp = compost, Rape = Compost + biochar de colza, Misc = compost + biochar de miscanthus, Ref = compost + biochar de refus de compostage (Nobile et al., 2022).

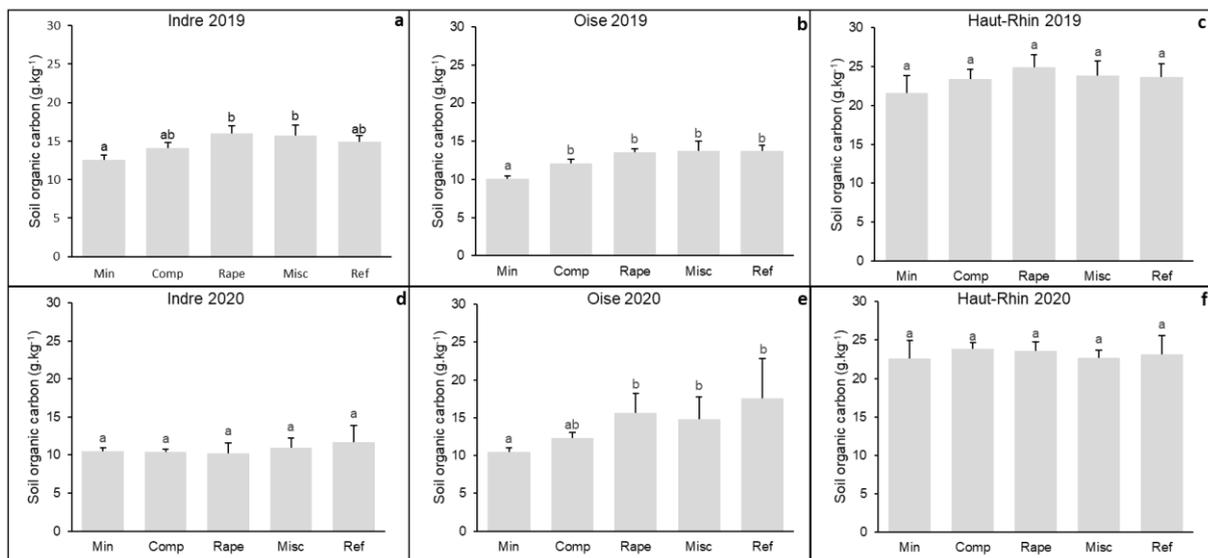


Figure 29. Concentration en carbone organique dans les sols en 2019 et en 2020 sur les trois sites (Indre, Oise et Haut-Rhin) en fonction des différents traitements: Min = traitement minéral PK, Comp = compost, Rape = Compost + biochar de colza, Misc = compost + biochar de miscanthus, Ref = compost + biochar de refus de compostage (Nobile et al., 2022).

Au-delà des impacts des mélanges biochar-compost sur les propriétés physico-chimiques du sol et la productivité des cultures, il est également important de caractériser l'influence de ces amendements sur la composante biologique du sol. Il est en effet aujourd'hui largement reconnu que le fonctionnement d'un agrosystème et sa capacité à délivrer des services écosystémiques dépend des organismes qu'il abrite et de leur activité (Briones, 2018; Brussaard et al., 2007). Afin de préciser notre compréhension de l'impact des mélanges biochar-compost sur le fonctionnement des agrosystèmes, nous avons suivi sur le site de Beauvais (Oise) l'évolution des communautés de vers de terre et des paramètres microbiologiques du sol pendant trois années culturales. L'échantillonnage a été réalisé sur le dispositif présenté précédemment que nous avons eu la chance de pouvoir conserver et prolonger pour une année supplémentaire, durant laquelle de l'orge a été semée et cultivée.

Concernant les vers de terre (Honvault et al., 2023), peu d'effets ont été observés à l'exception d'une légère augmentation de l'abondance totale des anéciques en présence de compost mélangé au biochar de refus de compost lors de la dernière année (i.e. en 2021) (Figure 30), possiblement en raison de l'augmentation en carbone organique dans le sol induite par ce mélange. De manière générale, ces résultats constituent l'une des rares preuves de l'impact pluriannuel des mélanges biochar-compost sur les communautés de vers de terre en région tempérée. Au niveau microbiologique, une kyrielle d'analyses réalisées avec le concours de nos collègues de AGHYLE-Rouen (UniLaSalle), notamment **Isabelle Gattin**, **Nadia Laurent**, **Lisa Castel** et **Babacar Thioye** ont révélé qu'à l'instar des autres variables étudiées, les mélanges biochar-compost avaient très peu d'effet sur les la plupart des paramètres microbiologiques mesurés.

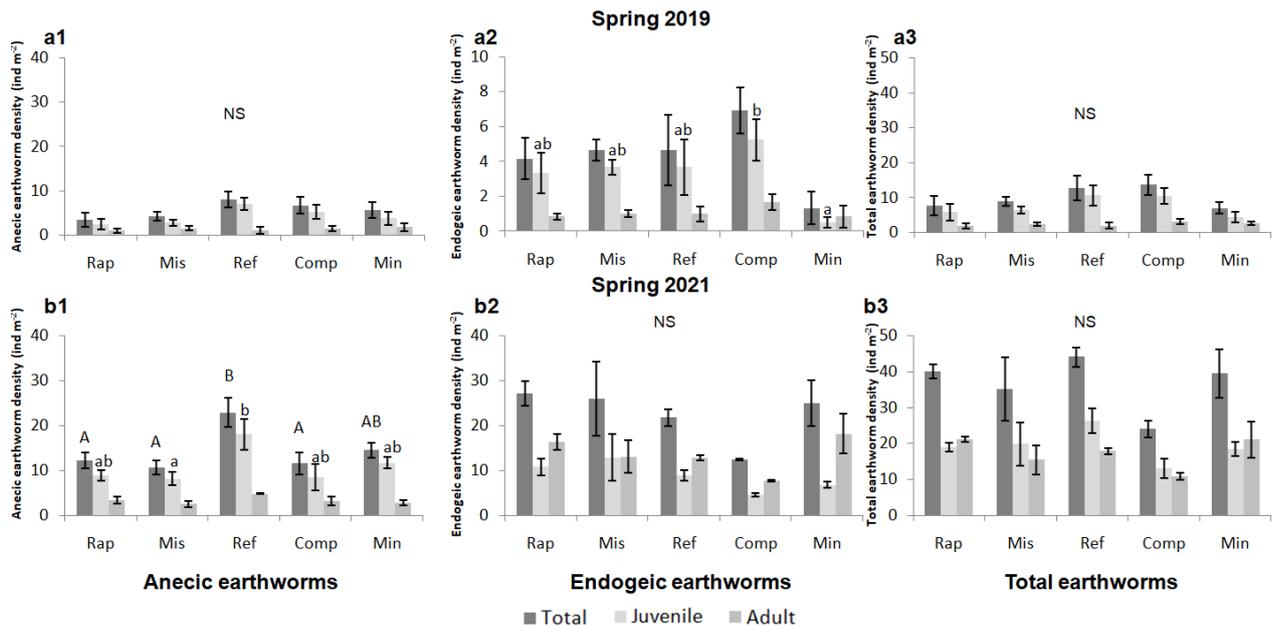


Figure 30. Abundance des vers de terre en 2019 et en 2021 sur les trois sites (Indre, Oise et Haut-Rhin) en fonction des différents traitements : Min = traitement minéral PK, Comp = compost, Rape = Compost + biochar de colza, Misc = compost + biochar de miscanthus, Ref = compost + biochar de refus de compostage (Honvault et al., 2023).

Enfin, il convient de préciser que les résultats issus de nos expérimentations en champ ne sont valables que pour le ratio biochar/compost et les taux d'application testés dans cette étude. Des apports plus ou moins importants ainsi que des ratios différents de ceux que nous avons utilisés pourraient affecter différemment la croissance des plantes ainsi que les cycles biogéochimiques des éléments (C, N, P, ...). C'est notamment ce que nous avons étudié à travers les travaux postdoctoraux de **Manhattan Lebrun** (Lebrun et al., 2023), démontrant que, selon le ratio biochar/compost dans le mélange, des effets de synergie pouvaient apparaître entre le compost et le biochar, en particulier en matière de disponibilité de l'azote pour la plante (Figure 31).

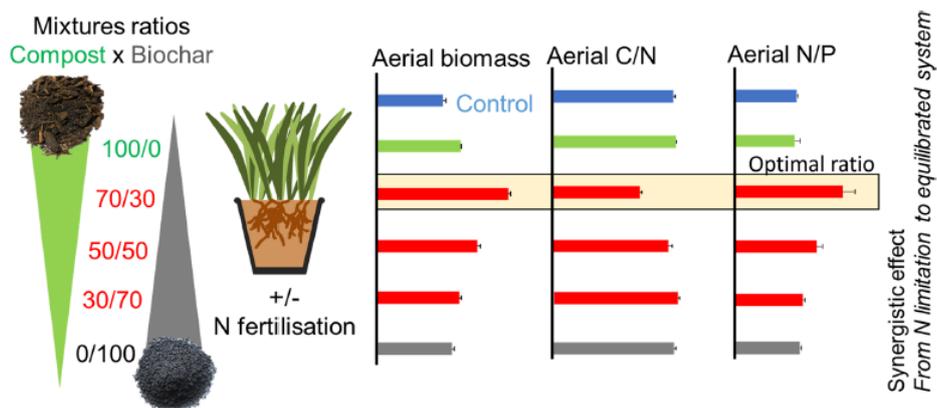


Figure 31. Schéma illustrant l'impact du ratio biochar/compost sur la croissance et la stœchiométrie C :N :P des plantes (Lebrun et al., 2023).

Bien que les résultats des expérimentations *in situ* n'apportent pas nécessairement de nouveaux éléments permettant d'améliorer notre compréhension mécanistique de l'effet des biochars sur le fonctionnement des sols et des agroécosystèmes, ils sont néanmoins importants non seulement pour la communauté scientifique mais également pour le grand public qui se questionne de plus en plus sur l'utilisation du biochar. Ils viennent en effet renforcer l'idée que l'apport de biochar en contexte tempéré ne booste pas les rendements mais peut en revanche apporter d'autres services écosystémiques (Bai et al., 2022; Farhangi-Abriz et al., 2021; Jeffery et al., 2017; Xu et al., 2021). Se

pose néanmoins la question de l'intérêt et de la faisabilité technico-économique pour un agriculteur d'utiliser du biochar pour atteindre ces objectifs compte tenu du coût actuellement prohibitif du biochar (environ 1000 euros pour une tonne, voire davantage) et de l'absence de garantie d'efficacité du biochar renforcée par le caractère irréversible de son application. Par conséquent, d'autres voies de valorisation du biochar pourraient être à privilégier. Parmi celles-ci, on retrouve de plus en plus l'incorporation de biochar dans les supports de culture (terreaux) (Steiner and Harttung, 2014). Le biochar dispose en effet d'un certain nombre de propriétés qui pourraient lui permettre de remplir les mêmes fonctions que celles assurées par la tourbe (Vandecasteele et al., 2023). C'est notamment ce qui a été confirmé lors du postdoc de **Cécile Nobile** : en testant l'impact six biochars aux propriétés contrastées sur la biomasse de différentes cultures horticoles, à savoir le basilic (*Ocimum basilicum* L.), la laitue (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*) et la pensée (*Viola wittrockiana* Gams.), nous avons globalement mis en évidence que les biochars à faible densité et à porosité élevée stimulent la production de biomasse des cultures. En revanche, les biochars présentant un pH élevé ou une conductivité électrique élevée impactent négativement la croissance des plantes, illustrant à nouveau la nécessité de mettre en parfaite adéquation les besoins des sols et des plantes avec les propriétés des biochars afin de garantir une utilisation optimale de ce matériau.

Le biochar : un atténuateur de l'effet des stress ?

Comme nous l'avons montré à travers nos études *in situ*, l'incorporation des mélanges biochar-compost dans les sols a peu d'impact sur les rendements et le fonctionnement du sol, probablement en raison de l'historique de fertilisation de ces sols et de l'absence de contrainte majeure susceptible de limiter la productivité des agroécosystèmes. Un des arguments souvent avancés pour justifier l'apport de biochar dans les sols est sa capacité à améliorer la rétention et la disponibilité en eau des sols, y compris en région tempérée (Razzaghi et al., 2020; Wang et al., 2019). Le changement climatique affecte et affectera considérablement le cycle hydrologique, entraînant une augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses (IPCC, 2021). Selon les scénarios climatiques actuels, le manque d'eau devrait être l'une des principales menaces pour la production agricole (FAO, 2011). En effet, environ deux tiers des surfaces cultivées dans le monde sont touchées par la sécheresse, et cette proportion devrait augmenter en raison du réchauffement climatique (Farooqi et al., 2020). En outre, les épisodes de sécheresse devraient être non seulement plus fréquents, mais aussi plus longs et plus intenses (Hari et al., 2020; Liu et al., 2018). Par conséquent, l'amélioration de la résistance des sols et des plantes à la sécheresse est un enjeu majeur pour les années à venir. Comme nous l'avons suggéré dans une revue de la littérature traitant des liens entre la matière organique des sols et la dynamique de l'eau (Védère et al., 2022), l'utilisation d'amendements organiques, dont les composts et les biochars, pourrait constituer un levier pour améliorer la résilience des sols face aux stress hydriques. Dans cette perspective, il est donc important de préciser le potentiel rôle que pourraient jouer ces deux amendements dans l'atténuation des effets causés par le manque d'eau.

D'autre part, les propriétés des amendements organiques évoluent dans le temps en raison des processus de vieillissement. Par exemple, dans une précédente étude, nous avons montré que l'altération physique des mélanges biochar-compost peut modifier la composition des matériaux en favorisant notamment la lixiviation des composés labiles (Aubertin et al., 2021). De manière générale, l'application d'amendements organiques et leur vieillissement peuvent affecter les propriétés du sol, des plantes et des micro-organismes (Paetsch et al., 2018; Sun et al., 2017). Jusqu'à présent, les études mécanistiques sur les effets des biochars et des composts au sein du continuum plante-sol en situation de déficit hydrique ont été peu nombreuses, les travaux existants abordant généralement les

compartiments plante et sol indépendamment. Un des objectifs du postdoc de **Charolette Védère**, que j'ai co-supervisée avec **Cornelia Rumpel** (CNRS), a été d'étudier l'effet des mélanges biochar-compost et de leur vieillissement naturel sur le système plante-sol en cherchant en particulier à déterminer (1) si l'application de ces amendements atténuait les effets négatifs du stress hydrique sur le développement des plantes et le fonctionnement microbien du sol et (2) si cet effet différait selon leur état vieillissement.

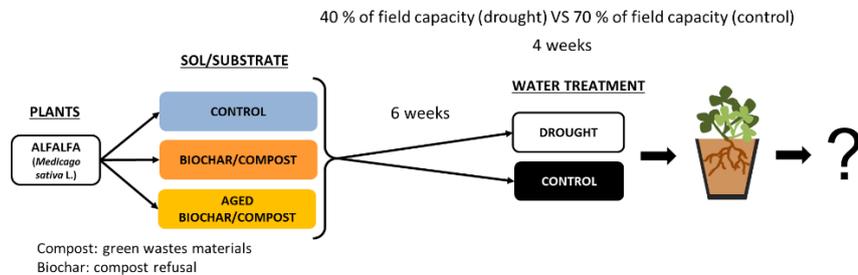


Figure 32. Illustration schématique de l'expérimentation destinée à étudier l'effet d'un mélange biochar-compost frais ou vieilli sur le fonctionnement du système sol-plante en condition d'alimentation hydrique optimale ou réduite.

A l'aide d'une expérience en conditions contrôlées dans laquelle nous avons appliqué, ou non, un stress hydrique à des plants de luzerne (*Medicago sativa*) cultivées sur des mélanges biochar-compost frais et vieillis deux ans en plein champ (Figure 32), nous avons montré que ces mélanges n'avaient pas ou peu d'impact sur la production de biomasse par la plante et le fonctionnement du sol en absence de stress hydrique, ce qui confirme nos précédents résultats (Figure 33). En revanche, nos résultats ont démontré que l'apport de biochar-compost pouvait atténuer les effets négatifs d'un stress hydrique sur le système sol-plante, en particulier lorsqu'il s'agissait de mélanges vieillis. Ainsi, sous stress hydrique, la conductance stomatique a par exemple été moins réduite avec le mélange vieilli (-79 % pour le mélange vieilli contre -87 % pour le contrôle), de même que la transpiration (pas d'impact pour le mélange vieilli contre une baisse de 69 % pour le contrôle). Les plantes cultivées en présence de mélanges vieillis ont également montré des concentrations réduites de proline (indicateur de stress hydrique) dans les feuilles (de deux à cinq fois) par rapport aux mélanges frais, indiquant une réduction du stress de la plante en situation de déficit hydrique. L'activité enzymatique du sol a elle aussi été moins affectée par le stress hydrique en présence du mélange biochar-compost vieilli. L'effet bénéfique des formules biochar-compost vieilles s'explique probablement par une plus grande colonisation des amendements par les microorganismes du sol durant la phase de vieillissement ainsi qu'une modification des propriétés des matériaux lors de leur vieillissement. Ainsi, l'oxydation de la surface du biochar pourrait avoir engendré par exemple une augmentation de sa CEC, lui permettant de retenir les éléments nutritifs libérés par le compost en décomposition, ainsi qu'une augmentation de son hydrophilie (Mia et al., 2017; Wang et al., 2020). Ces résultats prometteurs confirment qu'en condition tempérée, le biochar ne doit pas être utilisé pour booster les rendements des cultures mais plutôt pour apporter d'autres services, en l'occurrence ici, celui d'une meilleure résistance du sol et de la plante au stress hydrique et que ces effets bénéfiques pourraient croître avec le temps.

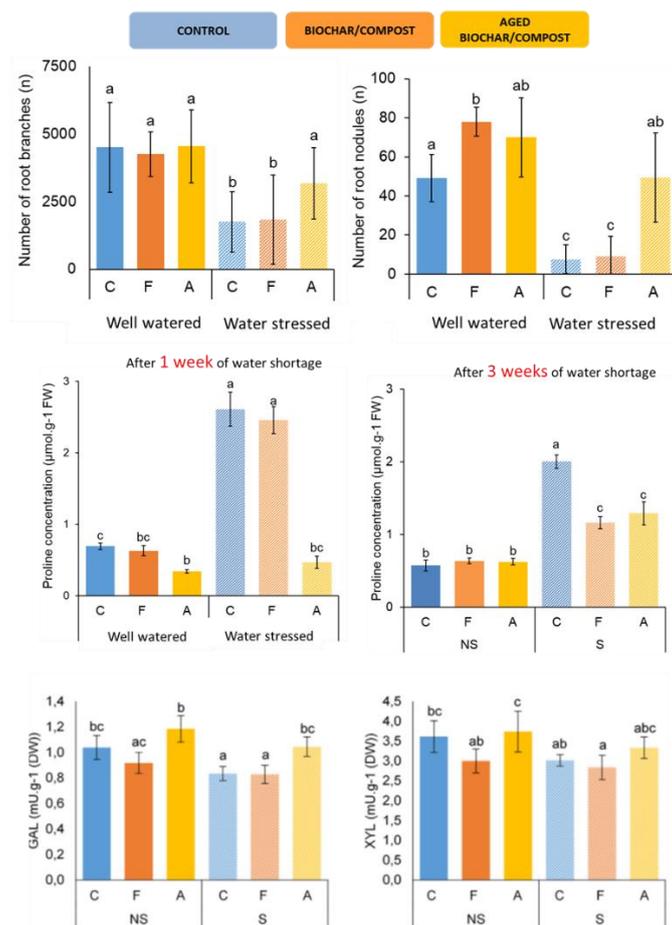


Figure 33. Nombre de racines détectées (root branches), nombre de nodules racinaires, concentration en proline dans les feuilles après une et trois semaines de déficit hydrique et activité de la β -galactosidase (GAL) et de la xylanase (XYL) dans le sol en fonction des traitements (C : contrôle, F : mélange de biochar-compost frais, A : mélange de biochar-compost altéré) et en situation d'alimentation hydrique optimale ou limitée (Védère et al., 2023).

Dissocier les effets directs des effets indirects

Les caractéristiques du biochar telles que sa surface spécifique (SA), sa capacité d'échange cationique (CEC), sa teneur en carbone organique et nutriments, son pH, sa densité et sa porosité contrôlent son influence sur le fonctionnement des écosystèmes et la performance des plantes via de multiples processus directs et indirects qui sont interconnectés (Sun et al., 2014). Le biochar peut améliorer la fertilité du sol en libérant des éléments nutritifs, en augmentant la CEC du sol ou encore en réduisant l'acidité du sol et contribuer ainsi directement à la nutrition des plantes (Ding et al., 2016). En modifiant le sol et l'environnement racinaire, le biochar peut également impacter la morphologie et le fonctionnement des racines (Xiang et al., 2017). Nous avons précédemment montré que des modifications de la réponse des traits végétaux à la suite d'un apport de matière exogène (cf. étude sur les boues par exemple ; Nobile et al., 2019) impactent indirectement le prélèvement de phosphore. Forts de ces travaux, nous avons donc voulu déterminer quelle était l'influence du biochar sur les traits des racines et ses conséquences sur l'acquisition de nutriments et la production de biomasse par la plante, celles-ci étant encore largement non quantifiée (Liu et al., 2021). En effet, comprendre l'impact global du biochar sur le système sol-plante afin d'optimiser sa gestion dans les agroécosystèmes nécessite d'être en mesure de déchiffrer et de quantifier non seulement l'effet direct du biochar sur

la nutrition de la plante mais également la contribution de l'interaction des propriétés du biochar avec les traits de la plante et, en particulier, ceux impliqués dans l'acquisition des nutriments.

Durant les postdocs de **Cécile Nobile** et **Nicolas Honvault**, nous avons développé une approche permettant d'examiner les covariations entre les propriétés des biochars et les traits des végétaux impliqués dans l'acquisition des nutriments (Honvault et al., 2022). Cette approche est basée sur (i) la mesure de la réponse de différents traits, du prélèvement d'éléments nutritifs et de la production de biomasse de la plante en présence d'une diversité de biochars présentant des propriétés contrastées et (ii) la modélisation des relations entre les variables observées (e.g. les traits) et les variables latentes (e.g. les propriétés des biochars) au moyen d'équations structurelles (PLS-PM), une méthode prometteuse déjà utilisée pour déchiffrer les relations entre de multiples facteurs interconnectés interagissant directement et indirectement dans le système sol-plante (Ali et al., 2017; Kim et al., 2021). Le but de ce travail n'était donc pas de décrire les effets du biochar sur la croissance des plantes mais plutôt de comprendre comment ces effets sont directement et indirectement influencés par les propriétés du biochar.

De manière intéressante, nous avons observé que la réponse de certains traits diffère selon le type de biochar incorporé. C'est en particulier le cas de la sécrétion de carboxylates par les racines (Figure 34) dont une analyse plus approfondie a montré que leur libération est positivement corrélée à la teneur en cendres des biochars. Les carboxylates étant impliqués dans l'acquisition de certains éléments nutritifs, du phosphore notamment (comme nous l'avons montré précédemment), il s'agit là d'un exemple de l'effet indirect que peut avoir le biochar sur la nutrition de la plante : non seulement, il peut fournir des éléments nutritifs à la plante mais, en impactant la libération de carboxylates par les racines, il impacte la stratégie d'acquisition des nutriments de la plante. Parmi tous les traits mesurés, la libération de carboxylates par les racines est apparue comme le trait le plus impactant vis-à-vis de la production de biomasse par la plante. Les autres traits (SRL, ΔpH , ...) avaient quant à eux très peu d'effet (Figure 35).

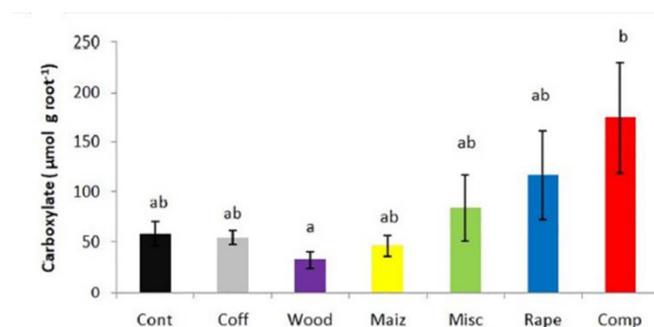


Figure 34. Quantité de carboxylates sécrétés par les racines en fonction des traitements (Cont : contrôle ; Coff, Wood, Maiz, Misc, Rape, Comp : biochar de coque de café, de résidus de bois, de paille de maïs, de paille de miscanthus, de paille de colza et de refus de compost, respectivement) (Honvault et al., 2022).

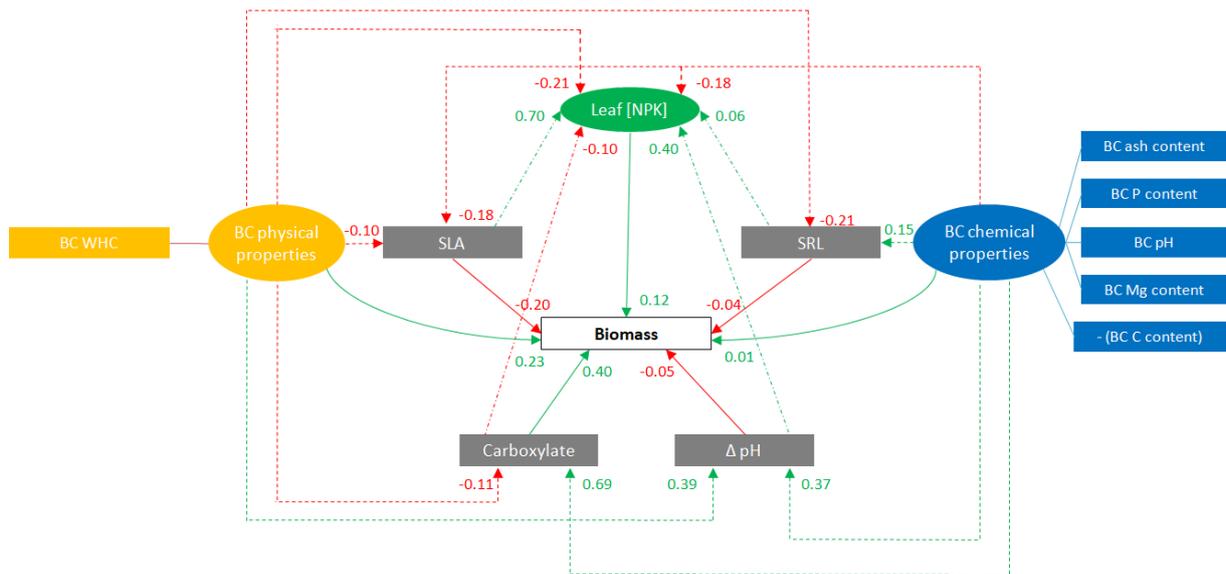


Figure 35. Modèle PLS décrivant les relations entre les propriétés du biochar, les traits des plantes, les concentrations en N, P et K dans les feuilles et la biomasse (Honvault et al., 2022).

Plus largement, grâce à la réalisation d'un modèle d'équations structurelles (PLS), nous avons révélé que le biochar impacte davantage la biomasse de la plante à travers ses effets indirects, en particulier la modification de la libération des carboxylates, elle-même impactée par les propriétés chimiques du biochar, plutôt que via des effets directs. Ces résultats sont particulièrement importants pour l'optimisation de l'utilisation du biochar comme amendement pour les sols car ils indiquent que les caractéristiques physico-chimiques ne sont pas suffisantes pour prédire l'impact du biochar sur la production de biomasse des plantes. Il est en effet indispensable de déterminer comment les modifications de l'environnement induites par la présence de biochar entraînent des répercussions indirectes sur les traits et les processus impliqués dans la croissance de la plante.

3.3. Réflexions sur mon bilan

Au-delà de renforcer ma motivation à passer l'HDR afin de donner un coup de fouet à mes questions de recherche et encadrer de jeunes chercheurs à travers la définition d'une stratégie de recherche large et originale, la rédaction de mon bilan de recherche m'a aussi permis de me rappeler l'essentiel même de ma fonction d'enseignant-chercheur. Aussi, il me paraît pertinent de délivrer, avec brièveté, les résultats de cette introspection.

Explorer constitue le socle de ma démarche intellectuelle. L'esthétisme du métier d'enseignant-chercheur réside en grande partie dans la capacité qu'il offre de pouvoir se poser des questions et de chercher à y répondre. Mon pain quotidien est constitué d'échanges et de réflexions avec les autres chercheurs, les étudiants et les acteurs, en particulier, du monde agricole. Ces discussions nourrissent chaque jour mon esprit et me stimulent en permanence à regarder vers l'avant.

Créer occupe une place centrale dans ma mission de chercheur. La contribution à la création de nouvelles connaissances et les élucubrations mises en œuvre pour concevoir de nouvelles expériences destinées à identifier ou quantifier des processus au sein du système sol-plante sont extrêmement stimulantes. Si mon échelle de prédilection a longtemps été celle du pot, j'apprécie beaucoup pouvoir conduire des expérimentations à plus petite échelle ou, au contraire, sur le terrain et en plein champ (Figure 36). La possibilité de pouvoir adopter une démarche multi-échelles grâce aux différentes infrastructures d'UniLaSalle (laboratoires, phytotrons, serres et parcelles expérimentales) m'offre une chance unique de pouvoir monter en complexité dans la compréhension des processus étudiés.



Figure 36. Illustration des différentes échelles auxquelles je travaille, du laboratoire à la parcelle en passant par le phytotron ou la serre.

Former représente une facette fondamentale de ma mission. L'opportunité de contribuer à guider des étudiants, des doctorants ou des professionnels dans leur compréhension des processus biogéochimiques opérant au sein du sol constitue une satisfaction continue. Partager ma passion pour la recherche, susciter l'enthousiasme des étudiants pour la gestion des sols en leur fournissant un espace d'apprentissage dont ils sont l'élément central et contribuer à leurs parcours académique et professionnel sont des éléments clés de mon engagement. La relation enseignant-étudiant est par ailleurs une association à bénéfice réciproque. Les échanges qu'elle implique alimentent la réflexion collective mais le devoir qui incombe à l'enseignant que je suis de devoir former les acteurs du monde de demain m'impose de rester en veille et à jour des dernières avancées en science du sol. Enfin, la formation à et par la recherche de nos étudiants m'a permis de nombreuses reprises de les initier à la démarche d'investigation scientifique tout en pouvant retirer des projets que j'ai encadrés des résultats scientifiques de haute qualité, certains ayant été par exemple valorisés sous forme de publication (Dulaurent et al., 2023, 2020; Houben et al., 2020, 2018).

Transmettre constitue également un pilier fondamental de ma mission. La transmission des connaissances, notamment en matière d'optimisation du fonctionnement des agroécosystèmes, est la pièce maîtresse de la construction d'un avenir plus durable. La transmission des connaissances ne doit néanmoins pas s'arrêter à la communauté scientifique. Par exemple, j'ai pu être à de nombreuses reprises sollicité pour être interviewé par des médias (presse écrite et télévisuelle), notamment pour parler du biochar, et j'ai toujours répondu présent car je considère qu'il est de mon devoir de pouvoir

participer à l'information de la société civile, des collectivités ou des entreprises. J'ai pris également beaucoup de plaisir à rédiger des articles ou des chapitres de vulgarisation pour faciliter l'appréhension des travaux scientifiques par le grand public. Enfin, ces objectifs de transmissions peuvent également être atteints grâce à des actions de science participative. Parmi les initiatives que j'ai pu mettre en œuvre en ce sens, je citerai en particulier une expérimentation conduite en collaboration avec l'association « Culture ailleurs » et le magazine « 4 saisons » édité par la maison d'édition « Terre vivante ». Très brièvement, il a été proposé aux lecteurs du magazine de tester l'effet du biochar sur la production de biomasse du radis et les propriétés de leurs sols en leur fournissant le matériel nécessaire (Figure 37). Grâce à la contribution d'une centaine d'abonnés ayant semé un total de 17 820 radis aux quatre coins de la France (Figure 37), nous avons mis en évidence un très léger effet bénéfique du biochar sur la production de biomasse, racinaire ou aérienne, dans les sols les plus acides ou les plus pauvres en argile. Au-delà des quelques résultats scientifiques qu'elle a générés et qui ont par ailleurs été publiés dans le bimestriel de juillet-août 2023 du magazine, cette expérimentation participative a surtout permis au grand public de se confronter à l'expérience de la mise en œuvre d'un protocole scientifique et de s'informer en direct sur l'intérêt potentiel que pouvait présenter le biochar. La société civile se questionne de plus en plus sur cette matière et, en tant que scientifiques, il est essentiel que nous soyons en mesure de lui apporter des réponses objectives, en combinant des approches fondamentales et de vulgarisation. Il s'agit là d'ailleurs de la beauté du métier d'enseignant-chercheur qui déchiffre les phénomènes complexes pour partager ses résultats à des publics pluriels et diversifiés.



Figure 37. (A) Répartition des « sites expérimentaux » des abonnés du magazine se lançant dans l'expérience et (B) illustration de l'appel à expérimentation collective ainsi que de la mise en place de l'étude chez les particuliers.

Agir sur l'avenir, c'est finalement la résultante des actions précédemment citées. Être acteur de et pour la société est le résultat tangible de mes efforts en tant qu'enseignant-chercheur en science du sol. C'est, en résumé, ce qui donne du sens à mon métier

4. Projet de recherche

Vers une meilleure compréhension des processus biogéochimiques au sein du système sol-plante : la clé pour le développement d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables

4.1. Contexte

Même si je n'envisage pas opérer un tournant radical dans la nature de mes activités, je souhaite aujourd'hui passer l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) afin de renforcer le développement de mon projet de recherche visant à améliorer la compréhension des processus biogéochimiques au sein du système sol-plante en vue de favoriser le développement d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables. La compréhension de ces processus est en effet indispensable dans un contexte de transition agroécologique où l'un des objectifs est de favoriser le bouclage des grands cycles pour limiter les pertes et gaspillages en promouvant l'augmentation de la biodiversité et la substitution des intrants minéraux par des matières fertilisantes issues de ressources renouvelables (effluents d'élevage, boues d'épuration, compost, biochar, ...) (Faucon et al., 2015; Gliessman, 2016). Compte tenu de la multiplicité des interactions biotiques et abiotiques et du couplage des cycles du carbone et des éléments nutritifs au sein du système sol-plante, l'acquisition de nouvelles connaissances sur les régulations biologiques et physico-chimiques des cycles biogéochimiques est requise afin d'être en mesure de quantifier et de prédire les intérêts et les limites des pratiques et techniques de culture innovantes et de mettre en place une gestion avisée des ressources pédologiques.

À travers une approche holistique basée sur l'analyse des processus biogéochimiques opérant à l'interface sol-plante, mon projet de recherche général ambitionne dès lors de mieux comprendre le fonctionnement des sols et leurs capacités à fournir des services écosystémiques compte tenu de leurs caractéristiques (propriétés et constituants) et de leur usage afin d'optimiser les pratiques de gestion des agroécosystèmes. Afin d'illustrer les activités générales de recherche que je souhaite développer, j'ai fait le choix de structurer mon projet en le positionnant dans le cadre de la conception de nouveaux systèmes de culture : il gravite ainsi autour de trois piliers de l'agroécologie et de l'agriculture de conservation fréquemment cités non seulement pour améliorer la production agricole mais aussi d'autres services écosystémiques, à savoir le recyclage des nutriments à travers l'utilisation d'amendements organiques, la réduction du travail du sol ou le non-labour et l'implantation d'un couvert, en particulier diversifié en espèces. Ces trois piliers ont également été identifiés comme des leviers prioritaires à actionner pour augmenter les stocks de carbone dans les sols agricoles français en réponse aux attentes du programme 4 pour 1000 (Pellerin et al., 2020). La démarche proposée dans ce projet se veut de complexité croissante : elle propose d'étudier les interactions sol-plante et leurs conséquences sur le fonctionnement du sol en réponse à l'apport d'amendements, puis aborde la question du travail du sol et de la stratification de la disponibilité en nutriments sur ces interactions et se clôture par l'intégration de la complexité de ces interactions dans les systèmes diversifiés en espèces végétales. Il est important de noter que parmi les éléments nutritifs étudiés, le phosphore sera l'élément modèle. En effet, la raréfaction des ressources minières de roche phosphatée conjuguée au risque que cet élément devienne de plus en plus limitant pour la productivité des agrosystèmes en raison des changements globaux (augmentation des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère, augmentation de la température et de la fréquence des sécheresses, ...) (Dijkstra et al., 2012; Hou et al., 2018; Wang et al., 2023) nous oblige à identifier urgemment des solutions permettant de favoriser

son recyclage dans les agroécosystèmes. D'autre part, comme mentionné dans mon bilan, cet élément a fait l'objet d'un programme structurant à UniLaSalle et, en particulier, au sein de l'unité AGHYLE (Amadou et al., 2021; Faucon et al., 2015). Nous avons non seulement développé de nouvelles techniques internes nous permettant d'analyser les processus impliqués dans sa mobilisation (libération de carboxylates ou d'enzymes spécifiques par exemple) (Honvault et al., 2021, 2020; Nobile et al., 2019), étudié le potentiel fertilisant de différentes sources (Amadou et al., 2022b; Gómez-Suárez et al., 2020; Houben et al., 2019, 2017) mais aussi capitalisé sur l'expertise de plusieurs collègues (écologie, écophysiole, (micro-)biologie du sol, chimie analytique ...) pour améliorer la caractérisation de son cycle biogéochimique. L'étude du phosphore permet donc le montage de projets collectifs, intégrant le domaine de compétences de nombreux collègues.

Le schéma de la figure 38 résume l'approche adoptée dans la présentation du projet. Gardons toutefois en tête que la liste des sujets abordés se veut davantage structurante qu'exhaustive.

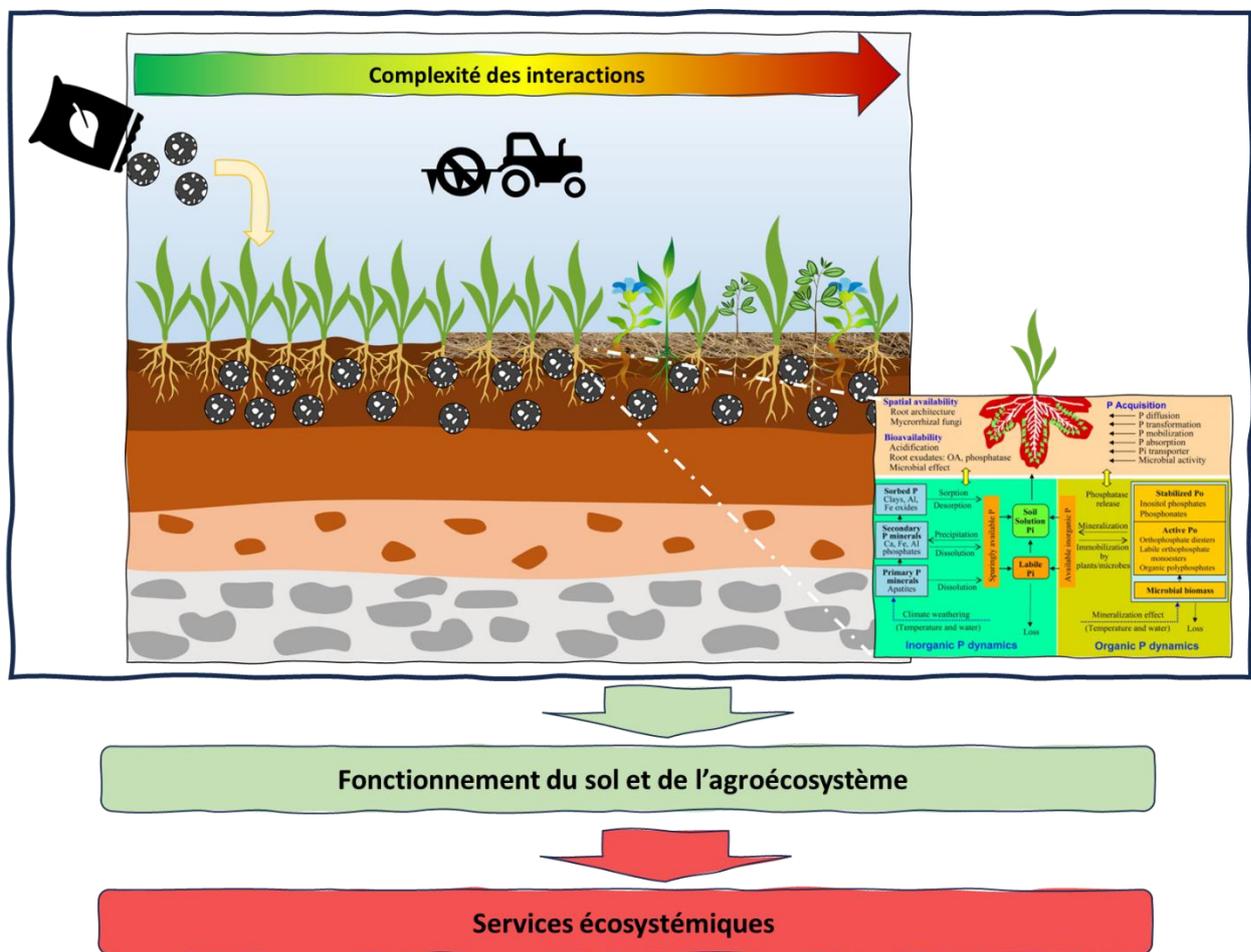


Figure 38. Schéma illustrant le cheminement de mon projet de recherche : au fur et à mesure de l'avancement, les interactions sont de plus en plus complexes. Après l'étude des interactions sol-plante et de leurs conséquences sur le fonctionnement du sol en réponse à l'apport d'amendements, la question du travail du sol et de la stratification de la disponibilité en nutriments sur ces interactions est abordée pour finir par intégrer la complexité de ces interactions dans les systèmes diversifiés en espèces végétales. Le phosphore est l'élément modèle pour l'étude de ces interactions sur les cycles biogéochimiques opérant au sein du système sol-plante. Les questions de recherche s'intègrent dans un objectif plus général consistant à améliorer notre compréhension du fonctionnement du sol et de l'agroécosystème pour favoriser la fourniture de services écosystémiques.

4.2. Optimisation de la gestion des amendements renouvelables : prise en compte des feedbacks, des effets directs et indirects et du temps

Pendant des siècles, la fourniture de nutriments aux cultures s'est principalement opérée via les processus naturels, comme l'altération des minéraux ou la fixation biologique de l'azote, ainsi qu'à travers l'utilisation de résidus organiques (effluents d'élevage et déchets domestiques) qui assuraient le recyclage en interne des nutriments. Cependant, ces apports naturels sont aujourd'hui insuffisants pour répondre aux besoins toujours croissants de la production agricole et il est par conséquent nécessaire de les compléter par d'autres apports le plus souvent issus de fertilisants minéraux (Tilman et al., 2002). Ce recours massif et fulgurant aux fertilisants pour satisfaire les objectifs de rendement (Figure 39) de la plupart des systèmes de production a engendré la création d'un modèle reposant sur une utilisation linéaire et inefficace des ressources mondiales, contribuant au déclin de la biodiversité, au changement climatique et à la dégradation de l'eau et des sols (Erisman et al., 2008; Lampert, 2019). Le remplacement de ces modèles linéaires par des modèles davantage circulaires est probablement l'une des alternatives les plus durables pour maintenir la production de biomasse, réduire le gaspillage et limiter la dépendance aux fertilisants de synthèse ou d'origine minière (Muscat et al., 2021). Comme nous l'avons récemment montré dans une revue de la littérature (Faucon et al., 2023), le développement d'une économie circulaire vise ainsi à surmonter les problèmes liés à l'économie linéaire en freinant l'exploitation et l'épuisement des ressources minières telles que les roches phosphatées, en encourageant les pratiques innovantes, en prévenant la dégradation des ressources naturelles et en favorisant le recyclage des sous-produits et des déchets agricoles ou agroalimentaires.

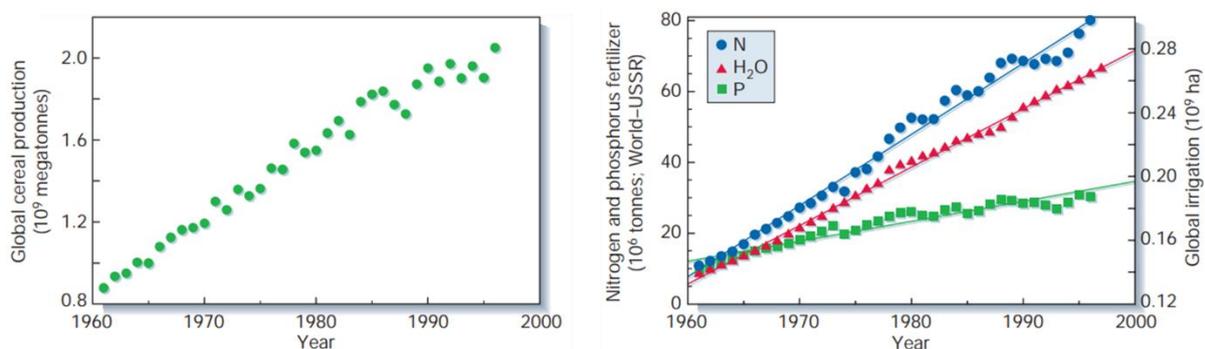


Figure 39. L'augmentation de la production globale de céréales s'accompagne d'une augmentation de l'utilisation de fertilisants et d'eau (Tilman et al., 2002).

Plus spécifiquement, le développement d'une économie circulaire basée sur le recyclage des nutriments constitue une excellente opportunité non seulement de reconnexion entre les lieux où les nutriments sont générés et ceux où ils sont nécessaires (Hidalgo et al., 2021), mais aussi de création de nouvelles chaînes de valeur durables (Toop et al., 2017). Par exemple, même s'il est nécessaire de mieux comprendre ses effets sur le fonctionnement des agroécosystèmes avant de déployer son utilisation à grande échelle, la production de biochar pour des applications dans les secteurs de l'agriculture et de l'environnement est de plus en plus perçue comme une stratégie potentiellement efficace pour valoriser les déchets tout en soutenant le développement de l'économie circulaire (Jindo et al., 2020). La production de biochar par pyrolyse ou pyrogazéification des déchets de biomasse génère de l'huile et/ou du syngaz qui peuvent être brûlés pour produire de la chaleur, de la vapeur et/ou de l'électricité, tandis que le biochar peut être utilisé, par exemple, comme amendement

multifonctionnel pour le sol (Bolan et al., 2022). Cependant, comme pour d'autres amendements, le développement d'une économie circulaire basée sur le biochar est actuellement entravé par de nombreuses incertitudes, notamment en raison des difficultés de lier les paramètres de pyrolyse aux propriétés finales du produit et d'obtenir du biochar homogène, du faible nombre d'expérimentations en champ et de longue durée mais aussi du manque de collaboration étroite entre les chercheurs, les producteurs et les consommateurs de biochar et le gouvernement (Hu et al., 2021).

Prenant pour cadre ce contexte de développement de l'économie circulaire, mes prochains travaux de recherche continueront d'étudier le rôle de ces amendements issus de déchets ou de sous-produits dans l'amélioration non seulement de la fertilité des sols mais aussi, de manière plus générale, du fonctionnement des sols et de leur capacité à délivrer des services écosystémiques. Si les matières « classiques » telles que les fumiers, lisiers et composts seront intégrées dans mes recherches, je continuerai à accorder une attention particulière aux « nouveaux » intrants, tels que les biochars, les digestats de méthanisation ou les déjections d'insectes que nous étudions depuis quelques années (Dulaurent et al., 2020; Honvault et al., 2022; Houben et al., 2020, 2013a; Nobile et al., 2022). Ceci nous permettra de positionner nos recherches au cœur des grands enjeux sociétaux tout en fournissant des connaissances permettant la production de conseils et de références pour les utilisateurs, en particulier dans un contexte de bioéconomie ou d'économie circulaire.

Je combinerai cette approche, relativement descriptive, d'évaluation du potentiel agronomique et environnemental de ces « nouveaux » amendements avec une approche davantage mécanistique cherchant à élucider (Figure 40) :

- les feedbacks entre ces amendements et le système sol plante, à savoir non seulement comment ces amendements impactent le fonctionnement du système sol-plante, ce qui est traditionnellement étudié par la majorité des travaux, mais aussi comment, en retour, le système sol-plante impacte l'efficacité des amendements ;
- la part des effets directs et indirects dans ces interactions ;
- l'effet du temps et du vieillissement des amendements sur ces interactions.

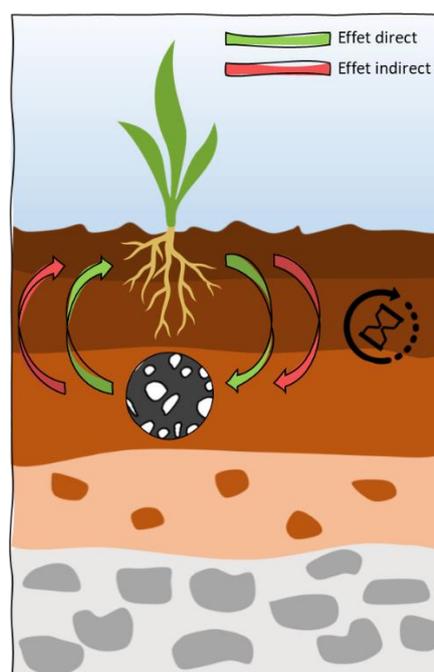


Figure 40. Un des objectifs de mes recherches sera d'étudier les feedbacks sol-plante-amendement, la part des effets directs et indirects dans ces interactions et l'effet du temps sur ces interactions.

Les postdocs de **Cécile Nobile** et de **Nicolas Honvault** étudiant l'effet des propriétés des biochars sur la réponse des traits racinaires (Honvault et al., 2022) et les processus de complémentarité et de facilitation entre les cultures associées (graminée et légumineuse ; résultats non publiés à ce jour) ainsi que le projet **STEPHOR** investiguant la réponse des traits racinaires de trois cultures en fonction du type de boue apportée (Nobile et al., 2019) constituent l'une des premières briques de mon objectif de mieux comprendre la modulation des interactions sol-plante par les amendements organiques. Ces travaux peuvent être complétés par le mémoire d'**Alexis Cousin** (2023) que j'ai co-encadré avec **Léa Kervroëdan** et qui a mis en évidence une variation importante de la réponse des traits des plantes à la quantité et aux types d'amendement (compost et biochar) apportés dans le cadre de stratégies de reconstitution de sols dégradés. Il s'agit maintenant de déterminer et de quantifier comment ces modifications de traits induites par l'application d'amendements impactent à leur tour le fonctionnement du sol et l'efficacité des amendements organiques. L'approche que nous avons développée pour quantifier les effets directs et indirects du biochar sur la production de biomasse par les plantes (Honvault et al., 2022) pourrait être optimisée et transposée à d'autres paramètres ou indicateurs du fonctionnement du sol. C'est notamment ce qui sera fait dans le projet de la thèse CIFRE d'**Estelle Jacquin** en partenariat avec le bureau d'étude OLM et la société d'économie mixte Oppidea qui a été déposé auprès de l'ANRT et que je co-dirigerai avec **Anne-Maïmiti Dulaurent**. L'objectif final de cette thèse est de quantifier l'effet des interactions entre les propriétés physico-chimiques des sols reconstitués à partir de compost et de biochar, la végétation mise en place et la faune du sol, sur la dynamique de refonctionnalisation des sols. Le but est également de développer de nouveaux indicateurs d'état fonctionnel des sols, tout en hiérarchisant l'impact quantitatif des variables physico-chimiques, agronomiques, biologiques, stochastiques et environnementales sur le fonctionnement du sol.

De plus, je pourrai également répondre à ces objectifs à travers le déploiement du projet **RAPETORR**. L'ambition de ce projet, soutenu par l'Agence de la transition écologique (ADEME) et porté par le groupe agroindustriel **Avril**, est de développer une nouvelle filière innovante et durable de pailles torréfiées d'une grande culture française (i.e. le colza), combinant des propriétés d'amendement de sol, de fertilisation et de stockage du carbone dans le sol. L'objectif est d'évaluer la valeur agronomique de la paille torréfiée, de quantifier sa capacité à séquestrer du carbone dans le sol et de confirmer ou non la viabilité économique et environnementale de la filière. Plus précisément, dans ce projet, je coordonnerai avec **Cornelia Rumpel** (Sorbonne U, CNRS) les essais en conditions contrôlées et en plein champ destinés non seulement à caractériser la valeur agronomique de la paille de colza et son impact sur le fonctionnement du sol selon différents niveaux de traitement thermique (pas de traitement, torréfaction et pyrolyse), mais aussi de comprendre les mécanismes régulant l'effet de la paille de colza torréfiée sur la fertilité du sol et la croissance des plantes. Une approche holistique sera développée, intégrant à la fois les paramètres du sol et de la plante (traits de réponse) et leurs interactions en fonction du degré d'altération des amendements (vieillessement artificiel des amendements au moyen d'un protocole développé dans le cadre du projet **FUI Biochar 2021** ; Aubertin et al., 2021). Ces études seront conduites par un postdoctorant (**Lucas Lesaint**) et une doctorante CIFRE (**Júlia Queiros Vieira**) que je co-dirigerai avec Cornelia Rumpel.

Enfin, l'effet du temps sur les interactions sol-plante-amendement pourra également être caractérisé à travers la mobilisation des deux dispositifs « biochar » qui ont été implantés sur les parcelles expérimentales d'UniLaSalle à Beauvais dans le cadre de deux projets que j'ai pilotés (FUI Biochar et ETIA). Ces deux dispositifs ont été maintenus depuis leur implantation en 2019 et 2021 (Figure 41) et constituent un terrain de jeu idéal pour étudier l'effet du temps sur l'évolution des services rendus par les interactions sol-plante-amendement.



Figure 41. Dispositifs *in situ* installés à UniLaSalle (Beauvais) testant l'impact du compost et des mélanges compost-biochar (A et C) et de la dose de biochar (5, 10 et 15 T ha⁻¹ ; B et C) sur le fonctionnement de l'agroécosystème.

4.3. Effet du travail du sol sur les interactions sol-plante : une question de stratification et d'accessibilité ?

L'adoption de pratiques de conservation du sol est de plus en plus préconisée pour réduire les effets négatifs de l'agriculture intensive sur la qualité des sols, limiter les émissions de gaz à effet de serre en réduisant la consommation de combustibles fossiles et améliorer l'efficacité économique en réduisant les coûts d'exploitation, de main-d'œuvre et d'intrants (Hobbs et al., 2007; Palm et al., 2014). Un principe fondamental de l'agriculture de conservation consiste à ne pas labourer le sol et à laisser les résidus végétaux en surface, cette couche formant un « mulch » dans lequel sont semées les cultures principales (Giller et al., 2015). En Europe, l'adoption du non-labour est beaucoup moins répandue que dans d'autres pays (Kertész and Madarász, 2014; Lahmar, 2010) et, bien que de nombreuses études aient montré que sa mise en œuvre pouvait offrir différents bénéfices, d'autres travaux indiquent que ces bénéfices ne sont pas systématiques (Autret et al., 2016; Dimassi et al., 2013; Soane et al., 2012).

Ces dernières années, avec plusieurs collègues de mon unité de recherche (**Anne-Maïmiti Dulaurent, Michel-Pierre Faucon, Léa Kervroëdan**), d'autres chercheurs comme **Matthieu Chauvat** de l'Université de Rouen ainsi que différentes structures comme **Agro-Transfert** ou l'**APAD** (Association pour la Promotion d'un Agriculture Durable), j'ai commencé à étudier les systèmes en agriculture de conservation en me focalisant essentiellement sur leur impact sur la minéralisation de la matière organique (Houben et al., 2018) et l'activité et la biodiversité des organismes du sol (Denier et al., 2022; Dulaurent et al., 2023).

S'il est important de continuer à conduire ces travaux sur la biologie des sols afin d'améliorer notre compréhension de l'impact de l'agriculture de conservation sur le fonctionnement des sols, il est essentiel de les mettre en perspective avec d'autres questions de recherche afin d'optimiser leur gestion, en particulier en matière de fertilisation. En effet, l'absence de labour induit inévitablement une stratification des propriétés et des constituants du sol. De nombreuses investigations ont étudié l'impact de cette stratification sur le stockage de carbone dans le sol (Blanco-Canqui and Lal, 2008; Franzluebbers, 2002; Luo et al., 2010) et, dans une moindre mesure, l'acidité du sol et l'accumulation

d'éléments nutritifs en surface (Crozier et al., 1999; Ramalho et al., 2020; Souza et al., 2023). En ce qui concerne le phosphore, l'impact du travail du sol sur sa stratification au sein du profil de sol a surtout été étudié dans le cadre de l'évaluation des risques que pouvait poser son accumulation pour les eaux de surface, les particules érodées et les eaux de ruissellement étant potentiellement plus concentrées en phosphore en situation de non labour (Daniel et al., 1998; Daverede et al., 2003). Quelques études ont également montré que les sols sans labour pouvaient présenter des concentrations en phosphore disponible plus élevées en surface (Muukkonen et al., 2007; Saavedra et al., 2007; Zhang et al., 2021). Cependant, afin d'optimiser la gestion de la disponibilité en phosphore dans les sols en fonction de la technique de travail du sol, il est important d'intégrer les interactions sol-plante impliquées dans la dynamique du phosphore. Par exemple, les techniques de travail du sol sont connues pour impacter l'architecture racinaire (Fiorini et al., 2018), la densité de racines étant généralement plus élevée en surface (0-5 cm) et plus faible en profondeur (5-15 cm) en systèmes en non labour par rapport aux systèmes conventionnels (Figure 42). Récemment, quelques travaux ont étudié l'impact des techniques de travail du sol sur les traits racinaires et ses conséquences sur le prélèvement du phosphore (Li et al., 2017a, 2017b) mais ces études se sont essentiellement focalisées sur les traits morphologiques des racines. Afin de mieux comprendre la dynamique du phosphore dans les sols non labourés, il est donc important d'étudier la réponse des autres traits racinaires à cette stratification. Par exemple, la thèse de Nicolas Honvault a mis en évidence la capacité de certaines plantes à libérer des exsudats racinaires afin de stimuler l'activité microbienne impliquée dans l'hydrolyse du phosphore organique. Dans des systèmes différant par leur technique de travail du sol, il conviendrait de déterminer dans quelle mesure cette stratégie varie en fonction de la stratification non seulement de la concentration et des formes de phosphore dans le sol mais aussi des communautés biologiques du sol.

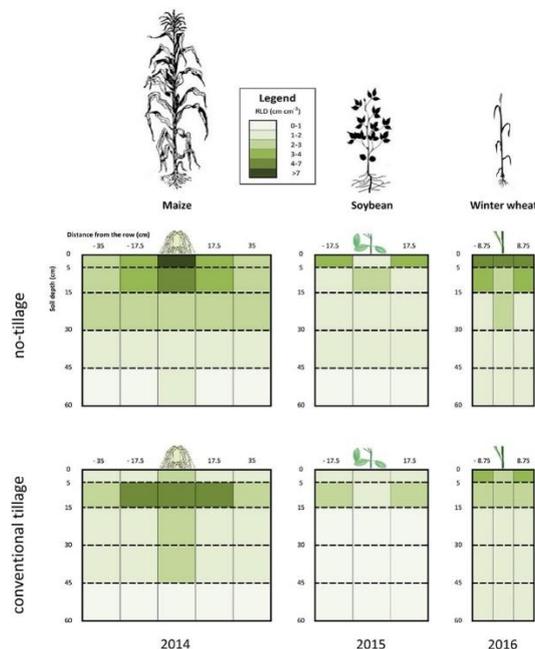


Figure 42. L'architecture racinaire (représentée ici par la « root length density ») est différente dans les conditions de labour et de non-labour du sol (Fiorini et al., 2018)

De même, l'activité de la phosphatase est généralement augmentée par la présence et l'activité des vers de terre, ce qui peut accroître la concentration en orthophosphate dans la solution du sol et, *in fine*, le prélèvement de phosphore par les racines (Vos et al., 2023). Dans la mesure où nos travaux, parmi d'autres, ont montré que le travail du sol avait un impact direct sur l'activité et les communautés faunistiques du sol (Denier et al., 2022; Dulaurent et al., 2023) (Figure 43), il est dès lors pertinent de

comprendre comment ces modifications biologiques induites par les pratiques de travail du sol influencent la disponibilité du phosphore au sein du système sol-plante. Enfin, au-delà des modifications chimiques et biologiques induites par la pratique de travail du sol, il est également important de prendre en compte son impact sur les propriétés physiques du sol. Par exemple, le type de travail du sol a un impact important sur la taille et la distribution des agrégats dans le sol (Bronick and Lal, 2005; Tebrügge and Düring, 1999). L'étude de ces modifications de dynamique d'agrégation a principalement été conduite dans le cadre de leurs impacts sur la dynamique de la matière organique et du carbone (Mikha and Rice, 2004; Six et al., 1999; Weidhuner et al., 2021). Cependant, il serait également pertinent d'investiguer le rôle joué par ces modifications d'agrégation sur la distribution physique et la disponibilité du phosphore. Dans la mesure où la forte sorption du phosphore dans le sol le rend très peu mobile, les racines des plantes (en association ou non avec les champignons mycorhiziens) doivent occuper un volume important du sol pour pouvoir maximiser l'absorption du phosphore. Par conséquent, le phosphore piégé au sein des agrégats et inaccessible physiquement aux racines ne pourra pas être prélevé par les plantes et ce, quelle que soit sa disponibilité chimique. De manière générale, l'un de mes objectifs sera dès lors de mettre en perspective et de concilier l'accessibilité physique du phosphore et sa disponibilité chimique pour les plantes (Figure 44).

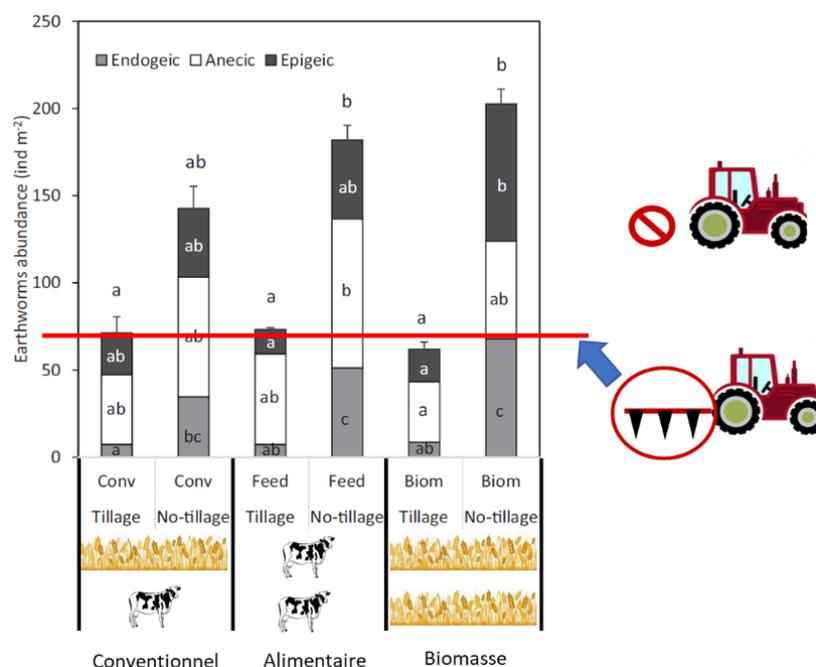


Figure 43. Abondance des vers de terre dans trois systèmes de culture contrastés. On voit que le système de culture n'a aucun impact en situation de travail du sol. En non-labour, l'abondance des vers de terre est plus élevée qu'en labour et se différencie selon le système de culture (selon Denier et al., 2022).

Au-delà des collaborations qui pourront être conduites avec les réseaux d'agriculteurs ainsi que différents partenaires nationaux ou internationaux, nous avons mis en place un dispositif expérimental *in situ* en 2016 sur nos parcelles expérimentales pour étudier ces questions. Ce dispositif expérimental est en effet constitué de trois systèmes de cultures contrastés, conduits tous les trois en labour et en non-labour du sol. Ce dispositif a d'abord été initié dans le cadre du projet RESIAR (Réseau de sites démonstrateurs IAR) qui visait à favoriser l'essor des filières de la bioéconomie au sein des territoires des Hauts-de-France), puis a été maintenu dans le cadre du projet AD'Méthas (pour un Approvisionnement Durable des METHaniseurs Agricoles par expérimentation de systèmes de culture innovants).

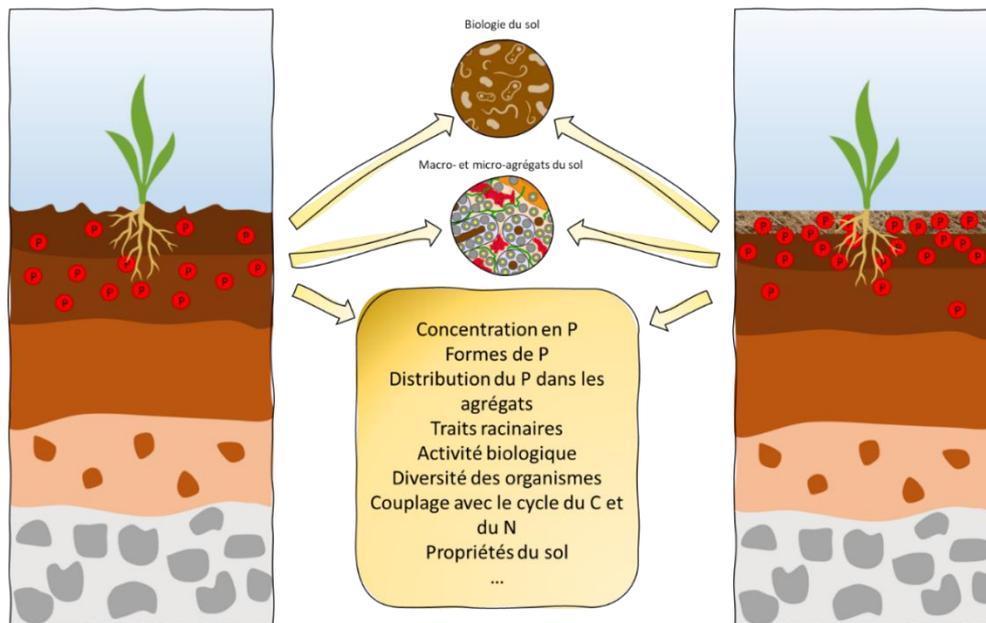


Figure 44. Schéma représentant les questions associées à l'analyse comparée des systèmes avec (à gauche) et sans labour (à droite).

4.4. Valoriser les interactions sol-plante dans les systèmes diversifiés en espèces végétales : application aux couverts intermédiaires

La bonne gestion des sols est l'une des pierres angulaires de la sécurité alimentaire et de la production agricole. Le sol fournit des services écosystémiques fondamentaux tels que l'approvisionnement en nourriture, la régulation du climat, la régulation de l'eau et le recyclage des nutriments (Scholes and Scholes, 2013). Selon Smith et al. (2015), la capacité du sol à fournir ces services dépend à la fois des processus biogéochimiques qui s'y opèrent et de la biodiversité qu'il abrite. Bien qu'il soit reconnu depuis longtemps que la biodiversité est à la base des performances et de la multifonctionnalité des écosystèmes (Balvanera et al., 2006; Jing et al., 2015; Tilman et al., 1996; Wagg et al., 2014) (Figure 45), l'intensification continue de l'agriculture et les modifications de l'utilisation des sols ont entraîné une réduction significative de la diversité des organismes du sol et des services écosystémiques délivrés par les agroécosystèmes (de Vries et al., 2013; Postma-Blaauw et al., 2010).

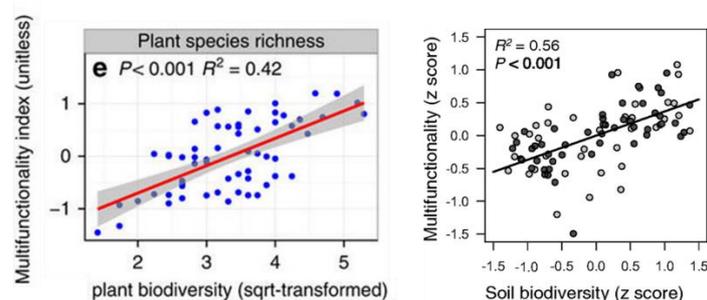


Figure 45. La multifonctionnalité d'un écosystème dépend de la biodiversité végétale (à gauche ; Jing et al., 2015) et de la biodiversité du sol (à droite ; Wagg et al., 2015)

Dans ce contexte, la recherche en agroécologie a eu pour ambition de développer de nouveaux systèmes de culture permettant de maintenir des rendements élevés tout en limitant l'utilisation d'énergie et d'intrants à travers l'intégration de la biodiversité dans le processus de production (Altieri, 2002; Lemanceau et al., 2015). L'un des leviers pour apporter davantage de diversité végétale dans les

agrosystèmes consiste à favoriser l'intégration de couverts intermédiaires diversifiés en espèces végétales au sein des systèmes de culture (Schipanski et al., 2014). En région tempérée, les couverts intermédiaires sont habituellement implantés entre l'été et l'hiver pour protéger le sol de l'érosion mais aussi enrichir le sol en matière organique, améliorer la structure du sol, limiter la perte d'éléments nutritifs par lixiviation, ruissellement et érosion, ou encore pour concurrencer les adventices. Bien que les couverts intermédiaires soient souvent constitués d'une seule espèce végétale (généralement la moutarde en Europe occidentale), les agriculteurs et les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la question de savoir si l'introduction de mélanges plus diversifiés en espèces pourrait présenter des avantages supplémentaires (Smith et al., 2014). L'hypothèse est qu'un mélange de cultures contenant une diversité d'espèces élevée fournirait une plus grande diversité de services qu'un couvert constitué d'une seule espèce (Faucon et al., 2017). Cependant, l'augmentation de la diversité végétale dans les agroécosystèmes s'accompagne d'une augmentation des interactions au sein du système sol-plante (Figure 46) qu'il est important de maîtriser, voire de valoriser, afin d'optimiser le fonctionnement de ces systèmes (Mariotte et al., 2018). En effet, si, comme j'ai pu l'écrire en introduction de mon bilan de recherches, la compréhension des processus opérant au sein de la rhizosphère est de plus en plus précise depuis sa conceptualisation par Hiltner (1904) et, surtout, compte tenu des recherches conduites depuis une vingtaine d'année qui reconnaissent son rôle fondamental dans le contrôle de la sécurité alimentaire et de la qualité de l'environnement (Hinsinger et al., 2009; Sparks, 2001; Wang et al., 2022; Wenzel et al., 2011), Neumann et Kandeler (2023) soulignent aujourd'hui la nécessité d'étudier les multiples interactions opérant au sein du système sol-plante afin de tirer parti au mieux des différents processus rhizosphériques dans la conception d'agroécosystèmes multifonctionnels et durables.

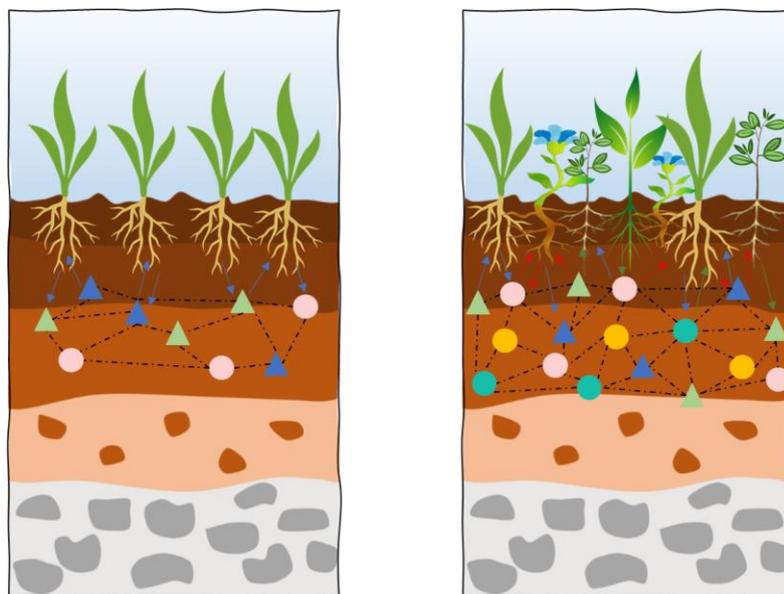


Figure 46. Comparaison de la complexité des interactions sol-plante entre un système constitué d'une seule espèce végétale (à gauche) et un système constitué de plusieurs espèces végétales (à droite) (inspiré de Mariotte et al., 2018)

En nous basant notamment sur ce qui a été observé dans les systèmes en intercropping (ou culture associée) dans lesquels l'association céréales/légumineuses peut améliorer l'efficacité de prélèvement du phosphore (Hinsinger et al., 2011; Li et al., 2008; Tang et al., 2021), notre revue de la littérature a mis en évidence le potentiel que pouvaient présenter les couverts intermédiaires multi-espèces pour améliorer la disponibilité du phosphore pour la culture suivante (Faucon et al., 2015). Les mécanismes

responsables de la meilleure efficacité de prélèvement du phosphore dans les couverts intermédiaires multi-espèces ont été attribués à des processus complémentaires et de facilitation ainsi qu'à une activité biologique du sol plus élevée (Hallama et al., 2019). Cependant, les quelques études examinant l'utilisation de couverts intermédiaires multi-espèces comme stratégie pour utiliser plus efficacement le phosphore du sol n'ont pas pris en compte l'effet potentiel des propriétés et des constituants du sol sur la modulation de ces interactions sol-plante, ni même comment le type de fertilisant pouvaient les impacter. Par conséquent, la quantité de phosphore rendue disponible par une communauté végétale cultivée (ici, les cultures intermédiaires) est encore largement inconnue et il est important d'élucider comment les formes de phosphore dans les sols et les amendements influencent l'efficacité des couverts intermédiaires multi-espèces à mobiliser le phosphore et, *in fine*, améliorer sa disponibilité.

Les travaux que nous avons conduits dans le cadre du projet de recherche STEPHOR (thèse inachevée d'Etienne Michel et postdoc de Cécile Nobile) et de la thèse d'Issifou Amadou ont apporté de nouvelles avancées concernant la possibilité d'utiliser des ressources organiques pour fertiliser les sols en phosphore. D'un autre côté, les résultats de la thèse de Nicolas Honvault ont mis en évidence que la diversité des stratégies de mobilisation et d'acquisition de phosphore que l'on pouvait rencontrer au sein des espèces constitutives des couverts végétaux pourrait être mise à profit pour favoriser le recyclage du phosphore dans les sols agricoles. Enfin, la thèse d'Issifou Amadou a démontré que l'efficacité des stratégies d'acquisition et de mobilisation du phosphore des espèces végétales dépend non seulement de la forme du phosphore dans le sol mais aussi des propriétés et des constituants du sol. La suite logique de ces travaux de recherche sera donc de capitaliser sur les différentes stratégies végétales afin d'optimiser l'utilisation du phosphore du sol et des ressources organiques pour l'amélioration de la disponibilité en phosphore. Un de mes objectifs de recherche sera dès lors de déterminer comment l'introduction de la diversité végétale et, en particulier, de la diversité de stratégies de mobilisation/acquisition de phosphore au sein des couverts intermédiaires peut favoriser la libération de phosphore à partir de ressources présentant une diversité de formes de phosphore incorporées dans une diversité de sols. Cette approche implique l'identification de la meilleure adéquation entre les traits des végétaux, ceux des amendements utilisés et ceux des sols en présence. L'hypothèse de travail est qu'en présence de formes de phosphore diversifiées (induite par exemple par l'utilisation d'amendements organiques), l'augmentation de la diversité fonctionnelle et la mise en place de stratégies de mobilisation/acquisition complémentaires au sein de la communauté cultivée devraient accroître la disponibilité du phosphore dans le sol et son efficacité de prélèvement. A titre d'exemple, la libération de phosphatases par une espèce pourrait favoriser la minéralisation du phosphore organique tandis que la libération de carboxylates par une autre pourrait prévenir la sorption des ions orthophosphate nouvellement en solution, selon la minéralogie du sol en présence. Pour répondre à ces objectifs, je souhaiterais pouvoir contribuer à la mise en place d'un réseau d'expérimentations, en conditions contrôlées ou *in situ*, par exemple dans le cadre d'un projet européen (EJP SOIL ou Biodiversa par exemple) afin entre autres d'acquérir des données de référence et de constituer une base de données dont l'analyse permettra de préciser le rôle de la diversité végétale dans la dynamique du phosphore.

Au-delà de l'approche expérimentale qui pourra être mise en œuvre pour tester de multiples combinaisons entre les formes de phosphore, les stratégies de mobilisation/acquisition du phosphore et les traits des sols, il sera, à plus long terme, important de développer de nouveaux modèles permettant de prendre en compte la complexité de ces interactions (Figure 47).

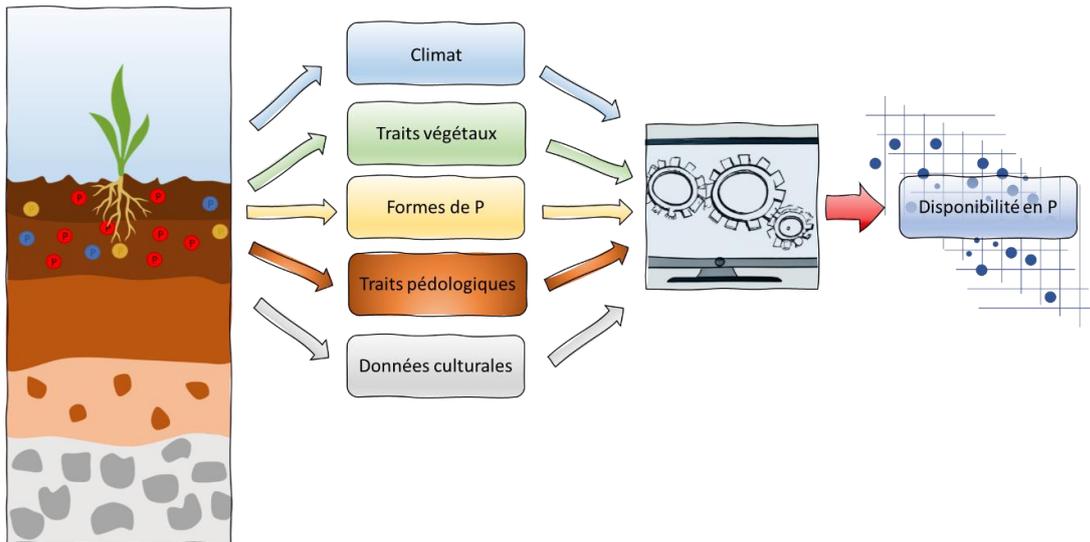


Figure 47. Schéma illustrant l'approche de modélisation : les traits végétaux impliqués dans l'acquisition et la mobilisation du phosphore, les formes de phosphore dans le sol, les traits pédologiques, les données climatiques et culturales (ex : date de semis, pratique d'implantation) sont intégrés dans un modèle afin d'estimer l'impact de leurs interactions sur la disponibilité en phosphore dans les sols.

Une première étape de modélisation de l'influence des couverts sur la disponibilité du phosphore a déjà été initiée à l'issue de la thèse de Nicolas Honvault. Cependant, celle-ci s'est uniquement intéressée à la libération du phosphore par le couvert en décomposition en se basant sur le modèle proposé par Damon et al. (2014) (Figure 48). Ce modèle présente l'avantage de ne requérir que quelques données mais l'inconvénient de ne pas prendre en compte la majorité des conditions présentes dans le sol. Le modèle n'intègre en effet que trois réservoirs de phosphore : i) le phosphore des résidus du couvert sous forme inorganique labile ou organique récalcitrante ; ii) le phosphore dans la biomasse microbienne du sol ; iii) le phosphore inorganique échangeable dans le sol. A plus long terme, il s'agira donc d'intégrer ce modèle dans un modèle plus large prenant en compte également les différents facteurs liés aux sols, aux plantes et aux amendements susceptibles d'influencer la disponibilité du phosphore.

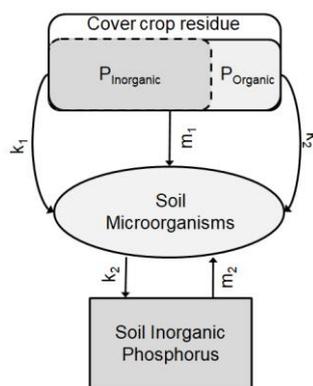


Figure 48. Structure du modèle destiné à prédire l'impact des résidus des couverts intermédiaires sur la disponibilité du phosphore. Les « résidus de cultures du couvert » englobent à la fois les formes inorganiques labiles de P et le P organique récalcitrant. k_1 et k_2 sont respectivement les constantes de décomposition des pools de P inorganique dans les résidus et de P organique dans les résidus. Les micro-organismes du sol accumulent une quantité de P m_1 en réponse à l'ajout de résidus et une quantité m_2 provenant des réserves de P inorganique échangeable dans le sol (si le P fourni à partir des résidus de cultures du couvert ne répond pas aux exigences microbiennes). Le turnover microbien et la libération de P immobilisé dans la biomasse microbienne se produisent selon la même constante de décomposition k_2 (Damon et al. 2014).

Bien que convaincu de l'utilité de ces modèles, je ne suis moi-même pas modélisateur. Cet objectif ne pourra dès lors se réaliser qu'à travers la mise en place de partenariats. La création de la nouvelle unité de recherche en numérique au sein d'UniLaSalle qui intégrera notamment une équipe de

modélisateurs et de mathématiciens ainsi que des collaborations avec **Olivier Pourret**, géochimiste et modélisateur au sein de l'unité AGHYLE, ou d'autres chercheurs de l'INRAE comme **Frédéric Gérard** ou **Alain Mollier** devraient faciliter la mise au point de tels modèles.

4.5. Coupler les cycles à travers leurs liens directs et indirects : l'exemple des carboxylates et de leurs effets cascade

L'approche que j'ai développée ci-dessus se veut la plus intégrative possible. En ce sens, elle ne se résume pas à l'étude d'un processus particulier mais ambitionne de tenir compte des modifications du processus étudié sur les autres cycles et les autres processus impliqués dans la fourniture de services écosystémiques par le sol. Dans ce paragraphe, j'illustrerai l'intérêt que je souhaite porter à ces effets cascade à l'aide de l'exemple de la rhizodéposition et plus particulièrement de la sécrétion de carboxylates par les racines. Jusqu'à présent, les principales recherches que j'ai pu conduire se sont focalisées sur l'importance des carboxylates dans l'altération des minéraux (Houben and Sonnet, 2012) et, surtout, la mobilisation du phosphore. Elles ont mis en évidence la capacité de certaines plantes à libérer davantage de carboxylates pour mobiliser directement le phosphore (Honvault et al., 2020; Nobile et al., 2019) ou indirectement en stimulant la croissance des bactéries impliquées dans le cycle du phosphore (Honvault et al., 2021). Nous avons également montré que leur libération pouvait être influencée par d'autres facteurs, notamment la disponibilité du phosphore et les formes sous lesquelles il est présent dans le sol (Houben et al., 2019), le type de minéraux (Amadou et al., 2022b) ou les propriétés des amendements apportés au sol (Honvault et al., 2022).

De récentes revues de la littérature soulignent néanmoins l'importance de considérer le rôle que jouent les carboxylates sécrétés par les racines dans le but d'acquérir du phosphore sur d'autres processus opérant au sein du sol (Cornelis and de Tombeur, 2022; Ding et al., 2021). Les carboxylates sont connus depuis longtemps pour leur rôle dans l'augmentation de la dissolution des minéraux (Jones, 1998). Les carboxylates peuvent en effet former des complexes à la surface des minéraux, ce qui favorise le détachement d'ions par les minéraux. La libération de carboxylates peut également modifier la spéciation des ions (Al, Fe, Zn, ...) à l'interface solide-solution en chélatant les ions en solution. Ceci maintient un gradient d'activité chimique élevé à proximité de la surface minérale qui contrôle le taux de dissolution des minéraux tout en maintenant la solution sous-saturée, ce qui empêche toute formation de minéraux secondaires (Drever and Stillings, 1997; Turpault et al., 2009). Cependant, les carboxylates n'agissent pas uniquement sur la phase inorganique du sol. Leur libération par les racines peut en effet favoriser la minéralisation du carbone et de l'azote en induisant un priming effect, les carboxylates stimulant directement la croissance microbienne. Les carboxylates peuvent aussi déstabiliser les agrégats et la matière organique protégées par des associations organo-minérales en chélatant le fer ou l'aluminium (Clarholm et al., 2015; Keiluweit et al., 2015), ce qui rend accessible aux microorganismes la matière organique précédemment protégée et favorise ainsi la minéralisation du carbone et de l'azote (Ding et al., 2021; Henneron et al., 2020; Yuan et al., 2018) (Figure 49). D'un autre côté, quelques récentes études ont démontré que la libération de carboxylates par les racines pouvait favoriser le stockage de carbone en promouvant la formation de minéraux d'ordre à courte portée (short-range order minerals, SRO) (Chatterjee et al., 2014; Yu et al., 2017). Les minéraux SRO, principalement représentés par les oxydes de fer et d'aluminium faiblement cristallisés, possèdent une surface spécifique élevée ainsi qu'un nombre important de groupe hydroxyles qui leur permet de stabiliser la matière organique du sol en formant des complexes organo-minéraux (Kiem and Kögel-Knabner, 2002; Kramer et al., 2012). Ainsi, Yu et al. (2017) ont suggéré l'existence d'une boucle rétroactive positive entre les amendements organiques, les exsudats racinaires et la stabilisation de la

matière organique, les amendements et les exsudats libérant des acides carboxyliques qui favorisent la formation des minéraux SRO, qui à leur tour stabilisent le carbone apporté par les amendements.

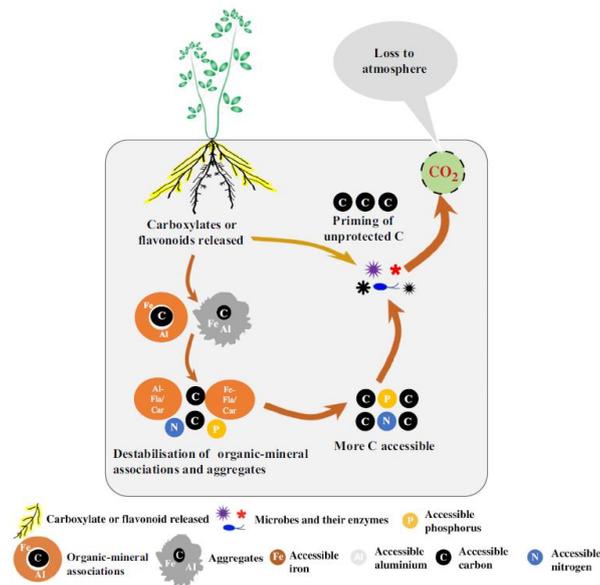


Figure 49. Influence de la libération de carboxylates par les racines sur le priming effect et la déprotection du carbone organique du sol (d'après Ding et al., 2021).

En réanalysant un jeu de données issu de mes précédentes recherches (Houben et al., 2011), j'ai mis en évidence non seulement une corrélation élevée entre la concentration en carbone dans les sols agricoles de la ceinture lœssique belge et la concentration en minéraux SRO, mais également une concentration en minéraux SRO plus élevée sous prairie que sous culture (Figure 50).

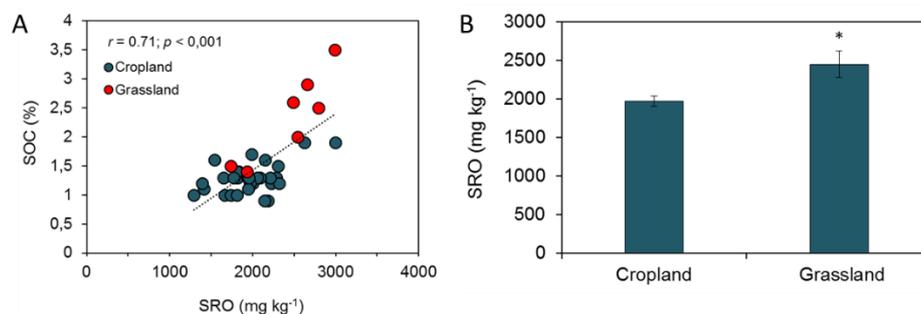


Figure 50. (A) Corrélation entre la concentration en carbone organique du sol et la concentration en minéraux SRO ($n = 37$) et (B) concentration en minéraux SRO dans les sols sous culture ($n = 30$) et sous prairie ($n = 7$). La concentration en minéraux SRO a été estimée comme étant la somme des concentrations en Al + $\frac{1}{2}$ Fe déterminées par extraction à l'oxalate d'ammonium.

Ces résultats doivent être interprétés avec prudence car ils ne sont issus que d'un faible échantillon de sols et ne permettent de compréhension mécanistique des phénomènes en jeu mais ils m'incitent néanmoins à investiguer davantage la conséquence des modifications de concentration en carboxylates induites par la disponibilité en phosphore, le choix des cultures ou la composition des amendements sur la dynamique du carbone et de l'azote. Cet objectif de recherche pourra être atteint en mobilisant les dispositifs expérimentaux mis en place pour répondre aux questions exposées précédemment et pourra compter sur l'expérience de mon collègue **Stéphane Firmin** dans le développement analytique de la détermination et de la quantification des carboxylates dans la rhizosphère. Il devra toutefois faire appel à d'autres collaborations pour l'identification des modifications des autres processus (priming effect, déstabilisation de la matière organique protégée, caractérisations de oxydes de fer et d'aluminium, ...).

4.6. Bilan et mise en perspective de mon projet de recherche

Ce n'est non sans mal que je suis parvenu à rédiger mon projet de recherche. En effet, malgré l'importance des sols pour la vie, le fonctionnement des écosystèmes et l'humanité, et la nécessité de mettre en place de multiples actions destinées à les protéger, j'ai dû opérer de nombreux choix pour développer mon projet et illustrer les activités que je souhaite mettre en place. Ces choix ne doivent néanmoins pas refléter une volonté de ma part de renoncer à d'autres actions destinées à valoriser les ressources pédologiques. Selon les opportunités, celles-ci pourront ou non s'inscrire dans mon objectif général qui consiste à mieux comprendre et valoriser les interactions sol-plante, dans un contexte de changements globaux (augmentation des aléas climatiques, épuisement des ressources, diminution de la biodiversité, ...), afin de contribuer à optimiser le développement de pratiques innovantes (réduction du travail du sol, intégration de la biodiversité végétale, utilisation d'amendements renouvelables, ...) et favoriser le fonctionnement du sol et des agroécosystèmes et leur capacité à délivrer des services écosystémiques (Figure 51).

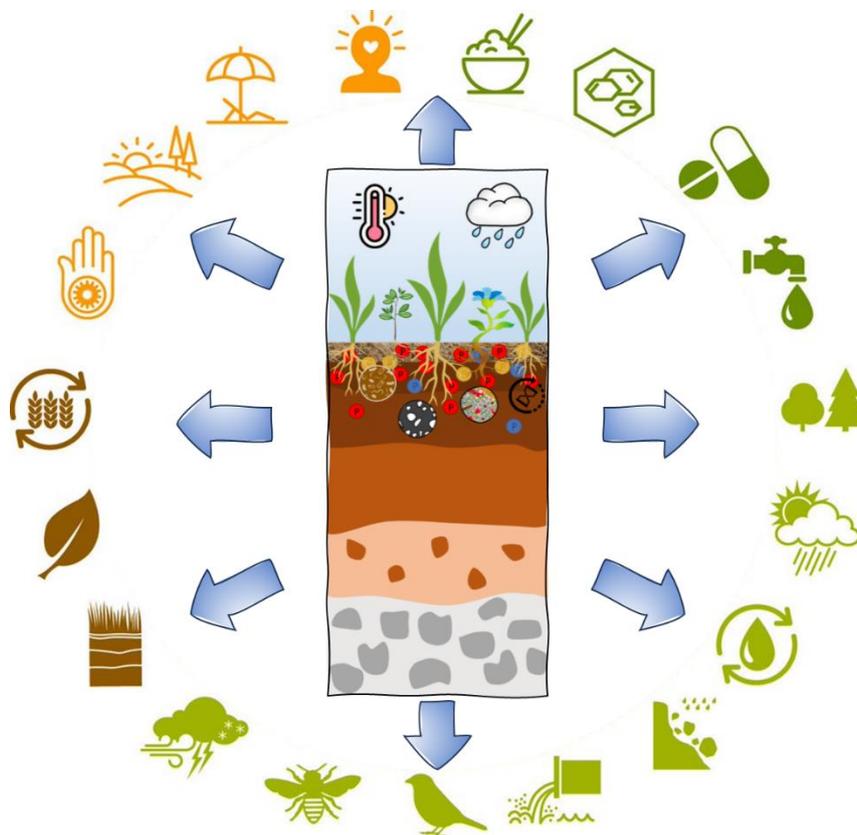


Figure 51. Représentation de mon objectif général : comment, dans un contexte de changements globaux (augmentation des aléas climatiques, épuisement des ressources, diminution de la biodiversité, ...), une meilleure compréhension et valorisation des interactions sol-plante peut-elle contribuer à optimiser le développement de pratiques innovantes (réduction du travail du sol, intégration de la biodiversité végétale, utilisation d'amendements renouvelables, ...) et favoriser le fonctionnement du sol et des agroécosystèmes et leur capacité à délivrer des services écosystémiques (les icônes représentant les services écosystémiques ont été produites par le WWF).

De plus, la rédaction d'un projet de recherche destiné à donner un aperçu des différents travaux que je conduirai dans les prochaines années ne doit pas donner l'impression que mes objectifs de recherche s'inscrivent dans un contexte statique, occultant par là la dynamique et l'évolution perpétuelle du monde. En d'autres termes, la planification à long terme est inévitablement confrontée à l'incertitude et à la constante mutation des facteurs qui caractérisent notre environnement.

Mes objectifs spécifiques de recherche sont donc par exemple susceptibles d'évoluer en fonction des opportunités émergentes et des défis liés aux changements climatiques et aux instabilités géopolitiques. Les changements climatiques exercent une pression de plus en plus importante sur la stabilité des systèmes agricoles, les épisodes de sécheresse étant globalement plus longs tandis que les événements pluvieux sont plus intenses. Les instabilités géopolitiques et, en particulier les crispations dans les relations internationales, les politiques commerciales, et les conflits à différentes échelles peuvent entraîner des répercussions importantes sur la disponibilité des ressources, les flux commerciaux et la stabilité des marchés agricoles. Ces incertitudes géopolitiques sont souvent difficiles à prendre en compte dans l'élaboration à long terme des projets de recherche. Bien qu'il soit important de garder le cap du projet scientifique et de ses ambitions, il est toutefois essentiel d'intégrer ces incertitudes dans les réflexions qui nous animent au quotidien afin d'être en mesure d'anticiper et d'adapter nos recherches aux réalités du monde qui nous entoure et d'améliorer le fonctionnement des agroécosystèmes dans un environnement en constante évolution.

Quels que soient les dédales du progrès scientifique, les évolutions technologiques, ou les changements sociétaux, l'humanité ne pourra jamais se soustraire à sa dépendance fondamentale envers les sols. Ainsi, peu importe la voie que prendront nos sociétés, la nécessité de préserver et d'améliorer le fonctionnement des sols reste un impératif incontournable pour assurer la pérennité de la planète, des écosystèmes et de notre bien-être. En ce sens, je m'estime chanceux de pouvoir occuper un poste d'enseignant-chercheur en science du sol. Ce poste m'offre l'opportunité de positionner mes recherches au cœur des grands enjeux pour notre planète tout en me demandant de faire preuve de flexibilité intellectuelle et d'adopter une approche pluridisciplinaire et multi-acteurs afin d'acquérir de nouvelles connaissances sur la conception de nouveaux agroécosystèmes et de les transmettre ensuite à travers la formation des futurs acteurs du changement. Ces missions sont incroyablement stimulantes !

5. Références

- Abdeljaoued, E., Brulé, M., Tayibi, S., Manolakos, D., Oukarroum, A., Monlau, F., Barakat, A., 2020. Bibliometric analysis of the evolution of biochar research trends and scientific production. *Clean Technol. Environ. Policy* 22, 1967. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01969-x>
- Ahmad, M., Lee, S.S., Lim, J.E., Lee, S.-E., Cho, J.S., Moon, D.H., Hashimoto, Y., Ok, Y.S., 2014. Speciation and phytoavailability of lead and antimony in a small arms range soil amended with mussel shell, cow bone and biochar: EXAFS spectroscopy and chemical extractions. *Chemosphere* 95, 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.077>
- Ahmed, I.I., Gupta, A.K., 2010. Pyrolysis and gasification of food waste: Syngas characteristics and char gasification kinetics. *Appl. Energy* 87, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.032>
- Ali, H.E., Reineking, B., Münckmüller, T., 2017. Effects of plant functional traits on soil stability: intraspecific variability matters. *Plant Soil* 411, 359–375. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3036-5>
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J.M., Amezcaga, I., Albizu, I., Garbisu, C., 2004. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 3, 71–90. <https://doi.org/10.1023/B:RESB.0000040059.70899.3d>
- Altieri, M.A., 2018. *Agroecology: The Science Of Sustainable Agriculture*, Second Edition. CRC Press.
- Altieri, M.A., 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3)
- Amadou, I., Faucon, M.-P., Houben, D., 2022a. New insights into sorption and desorption of organic phosphorus on goethite, gibbsite, kaolinite and montmorillonite. *Appl. Geochem.* 143, 105378.
- Amadou, I., Faucon, M.-P., Houben, D., 2022b. Role of soil minerals on organic phosphorus availability and phosphorus uptake by plants. *Geoderma* 428, 116125. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116125>
- Amadou, I., Houben, D., Faucon, M.-P., 2021. Unravelling the role of rhizosphere microbiome and root traits in organic phosphorus mobilization for sustainable phosphorus fertilization. A review. *Agronomy* 11, 2267.
- Amoakwah, E., Arthur, E., Frimpong, K.A., Lorenz, N., Rahman, M.A., Nziguheba, G., Islam, K.R., 2022. Biochar amendment impacts on microbial community structures and biological and enzyme activities in a weathered tropical sandy loam. *Appl. Soil Ecol.* 172, 104364. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104364>
- Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D., Hipps, N.A., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
- Aubertin, M.-L., Girardin, C., Houot, S., Nobile, C., Houben, D., Bena, S., Brech, Y.L., Rumpel, C., 2021. Biochar-compost interactions as affected by weathering: Effects on biological stability and plant growth. *Agronomy* 11, 336.
- Autret, B., Mary, B., Chenu, C., Balabane, M., Girardin, C., Bertrand, M., Grandeau, G., Beaudoin, N., 2016. Alternative arable cropping systems: A key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 232, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008>
- Bai, S.H., Omidvar, N., Gallart, M., Kämper, W., Tahmasbian, I., Farrar, M.B., Singh, K., Zhou, G., Muqadass, B., Xu, C.-Y., Koech, R., Li, Y., Nguyen, T.T.N., van Zwieten, L., 2022. Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 808, 152073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152073>
- Balvanera, P., Pfisterer, A.B., Buchmann, N., He, J.-S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., Schmid, B., 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* 9, 1146–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., Makowski, D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Glob. Change Biol.* 27, 4697–4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2008. No-Tillage and Soil-Profile Carbon Sequestration: An On-Farm Assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 693–701. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0233>
- Bolan, N., Hoang, S.A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., Joseph, S., Jung, S., Kim, K.-H., Kirkham, M.B., Kua, H.W., Kumar, M., Kwon, E.E., Ok, Y.S., Perera, V., Rinklebe, J., Shaheen, S.M., Sarkar, B., Sarmah, A.K., Singh, B.P., Singh, G., Tsang, D.C.W., Vikrant, K., Vithanage, M., Vinu, A., Wang, H., Wijesekara, H., Yan, Y., Younis, S.A., Van Zwieten, L., 2022. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *Int. Mater. Rev.* 67, 150–200. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1922047>
- Boulaine, J., 2006. Histoire de la fertilisation phosphatée 1762-1914. *Etude Gest. Sols* 13, 129–137.
- Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Lassaletta, L., van Apeldoorn, D.F., van Grinsven, H.J.M., Zhang, J., Ittersum van, M.K., 2017. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Sci. Rep.* 7, 40366. <https://doi.org/10.1038/srep40366>
- Briones, M.J.I., 2018. The serendipitous value of soil fauna in ecosystem functioning: The unexplained explained. *Front. Environ. Sci.* 6.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

- Brussaard, L., de Ruiter, P.C., Brown, G.G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ.*, Biodiversity in Agricultural Landscapes: Investing without Losing Interest 121, 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>
- Chatterjee, D., Datta, S.C., Manjaiah, K.M., 2014. Transformation of short-range order minerals in maize (*Zea mays* L.) rhizosphere. *Plant Soil Environ.* 60, 241–248. <https://doi.org/10.17221/800/2013-PSE>
- Clarholm, M., Skjällberg, U., Rosling, A., 2015. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter – The unbutton model. *Soil Biol. Biochem.* 84, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.019>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Change, Traditional Peoples and Climate Change* 19, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Cornelis, J.-T., de Tombeur, F., 2022. Soil controls on carboxylate-driven processes and opportunities. *Plant Soil* 476, 239–250. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05549-4>
- Couder, E., Mattielli, N., Drouet, T., Smolders, E., Delvaux, B., Iserentant, A., Meeus, C., Maerschalk, C., Opfergelt, S., Houben, D., 2015. Transpiration flow controls Zn transport in *Brassica napus* and *Lolium multiflorum* under toxic levels as evidenced from isotopic fractionation. *Comptes Rendus Geosci., Geochemical and isotopic record of anthropogenic activities (Part 2)* 347, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.05.004>
- Crozier, C.R., Naderman, G.C., Tucker, M.R., Sugg, R.E., 1999. Nutrient and pH stratification with conventional and no-till management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 65–74. <https://doi.org/10.1080/00103629909370184>
- Curie, C., Panaviene, Z., Loulergue, C., Dellaporta, S.L., Briat, J.-F., Walker, E.L., 2001. Maize yellow stripe1 encodes a membrane protein directly involved in Fe(III) uptake. *Nature* 409, 346–349. <https://doi.org/10.1038/35053080>
- Damon, P.M., Bowden, B., Rose, T., Rengel, Z., 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biol. Biochem.* 74, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.003>
- Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Lemunyon, J.L., 1998. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *J. Environ. Qual.* 27, 251–257. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020002x>
- Darrah, P.R., 1993. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant Soil* 155, 1–20. <https://doi.org/10.1007/BF00024980>
- Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P.-A., Zhao, W., 2018. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Sci. Rev.* 185, 357–373. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>
- Daverede, I.C., Kravchenko, A.N., Hoef, R.G., Nafziger, E.D., Bullock, D.G., Warren, J.J., Gonzini, L.C., 2003. Phosphorus Runoff. *J. Environ. Qual.* 32, 1436–1444. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1436>
- Dawson, C.J., Hilton, J., 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy, The challenge of global food sustainability* 36, S14–S22. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.012>
- de Vries, F.T., Thébault, E., Liiri, M., Birkhofer, K., Tsiafouli, M.A., Björnlund, L., Bracht Jørgensen, H., Brady, M.V., Christensen, S., de Ruiter, P.C., d’Hertefeldt, T., Frouz, J., Hedlund, K., Hemerik, L., Hol, W.H.G., Hotes, S., Mortimer, S.R., Setälä, H., Sgardelis, S.P., Uteseny, K., van der Putten, W.H., Wolters, V., Bardgett, R.D., 2013. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 14296–14301. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305198110>
- Deal, C., Brewer, C.E., Brown, R.C., Okure, M.A.E., Amoding, A., 2012. Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics. *Biomass Bioenergy* 37, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.017>
- Deiss, L., de Moraes, A., Maire, V., 2018. Environmental drivers of soil phosphorus composition in natural ecosystems. *Biogeosciences* 15, 4575–4592. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4575-2018>
- Denier, J., Faucon, M.-P., Dulaurent, A.-M., Guidet, J., Kervroëdan, L., Lamerre, J., Houben, D., 2022. Earthworm communities and microbial metabolic activity and diversity under conventional, feed and biogas cropping systems as affected by tillage practices. *Appl. Soil Ecol.* 169, 104232.
- Derakhshan Nejad, Z., Jung, M.C., Kim, K.-H., 2018. Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environ. Geochem. Health* 40, 927–953. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9964-z>
- Desautly, A.-M., Petelet-Giraud, E., 2020. Zinc isotope composition as a tool for tracing sources and fate of metal contaminants in rivers. *Sci. Total Environ.* 728, 138599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138599>
- Dijkstra, F.A., Pendall, E., Morgan, J.A., Blumenthal, D.M., Carrillo, Y., LeCain, D.R., Follett, R.F., Williams, D.G., 2012. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland. *New Phytol.* 196, 807–815. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04349.x>
- Dimassi, B., Cohan, J.-P., Labreuche, J., Mary, B., 2013. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 169, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.01.012>
- Ding, W., Cong, W.-F., Lambers, H., 2021. Plant phosphorus-acquisition and -use strategies affect soil carbon cycling. *Trends Ecol. Evol.* 36, 899–906. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.005>
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., Zheng, B., 2016. Biochar to improve soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>

- Ditzler, L., van Apeldoorn, D.F., Pellegrini, F., Antichi, D., Bàrberi, P., Rossing, W.A.H., 2021. Current research on the ecosystem service potential of legume inclusive cropping systems in Europe. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 26. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00678-z>
- Drever, J.I., Stillings, L.L., 1997. The role of organic acids in mineral weathering. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp., Aquatic Colloid and Surface Chemistry* 120, 167–181. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(96\)03720-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(96)03720-X)
- Dulaurent, A.-M., Daoulas, G., Faucon, M.-P., Houben, D., 2020. Earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) mediate the fertilizing effect of frass. *Agronomy* 10, 783.
- Dulaurent, A.-M., Houben, D., Honvault, N., Faucon, M.-P., Chauvat, M., 2023. Beneficial effects of conservation agriculture on earthworm and Collembola communities in Northern France. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05916-9>
- Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z., Winiwarter, W., 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat. Geosci.* 1, 636–639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
- FAO, 2011. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems at Risk*. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9780203142837>
- Farhangi-Abri, S., Torabian, S., Qin, R., Noulas, C., Lu, Y., Gao, S., 2021. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 775, 145869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145869>
- Farooqi, Z.U.R., Ayub, M.A., Zia ur Rehman, M., Sohail, M.I., Usman, M., Khalid, H., Naz, K., 2020. Chapter 4 - Regulation of drought stress in plants, in: Tripathi, D.K., Pratap Singh, V., Chauhan, D.K., Sharma, S., Prasad, S.M., Dubey, N.K., Ramawat, N. (Eds.), *Plant Life Under Changing Environment*. Academic Press, pp. 77–104. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818204-8.00004-7>
- Faucon, M.-P., Aussenac, T., Debref, R., Firmin, S., Houben, D., Marraccini, E., Sauvée, L., Trinsoutrot-Gattin, I., Gloaguen, R., 2023. Combining agroecology and bioeconomy to meet the societal challenges of agriculture. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06294-y>
- Faucon, M.-P., Houben, D., Lambers, H., 2017. Plant functional traits: soil and ecosystem services. *Trends Plant Sci.* 22, 385–394.
- Faucon, M.-P., Houben, D., Reynoird, J.-P., Mercadal-Dulaurent, A.-M., Armand, R., Lambers, H., 2015. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Adv. Agron.* 134, 51–79.
- Fiorini, A., Boselli, R., Amaducci, S., Tabaglio, V., 2018. Effects of no-till on root architecture and root-soil interactions in a three-year crop rotation. *Eur. J. Agron.* 99, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.07.009>
- Fixen, P.E., Johnston, A.M., 2012. World fertilizer nutrient reserves: a view to the future. *J. Sci. Food Agric.* 92, 1001–1005. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4532>
- Franzluebbers, A.J., 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Tillage Res., Conservation Tillage and Stratification of Soil Properties* 66, 95–106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00018-1)
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A., 2008. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320, 889–892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- Giles, C., Cade-Menun, B., Hill, J., 2011. The inositol phosphates in soils and manures: Abundance, cycling, and measurement. *Can. J. Soil Sci.* 91, 397–416. <https://doi.org/10.4141/cjss09090>
- Giller, K.E., Andersson, J.A., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., Vanlauwe, B., 2015. Beyond conservation agriculture. *Front. Plant Sci.* 6.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W., 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88, 37–41.
- Gliessman, S., 2016. Transforming food systems with agroecology. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 40, 187–189. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765>
- Gómez-Suárez, A.D., Nobile, C., Faucon, M.-P., Pourret, O., Houben, D., 2020. Fertilizer potential of struvite as affected by nitrogen form in the rhizosphere. *Sustainability* 12, 2212.
- Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., Kandeler, E., 2019. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil* 434, 7–45. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>
- Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., Kumar, R., 2020. Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci. Rep.* 10, 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>
- Hartley, W., Dickinson, N.M., Riby, P., Lepp, N.W., 2009. Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with *Miscanthus*. *Environ. Pollut.* 157, 2654–2662. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.011>
- Henneron, L., Kardol, P., Wardle, D.A., Cros, C., Fontaine, S., 2020. Rhizosphere control of soil nitrogen cycling: a key component of plant economic strategies. *New Phytol.* 228, 1269–1282. <https://doi.org/10.1111/nph.16760>
- Hidalgo, D., Corona, F., Martín-Marroquín, J.M., 2021. Nutrient recycling: from waste to crop. *Biomass Convers. Biorefinery* 11, 207–217. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00590-3>
- Hiltner, L., 1904. Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiet der Bodenbakteriologie und unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. *Arb. Dtsch. Landwirtschaft. Ges.* 98, 59–78.
- Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., Young, I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant Soil* 321, 117–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>

- Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., Tang, X., Zhang, F., 2011. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiol.* 156, 1078–1086. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175331>
- Hinsinger, P., Gobran, G.R., Gregory, P.J., Wenzel, W.W., 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytol.* 168, 293–303. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01512.x>
- Hobbs, P.R., Sayre, K., Gupta, R., 2007. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 543–555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Honvault, N., Houben, D., Firmin, S., Megloul, H., Laruelle, F., Fontaine, J., Lounès-Hadj Sahraoui, A., Coutu, A., Lambers, H., Faucon, M., 2021. Interactions between below-ground traits and rhizosphere fungal and bacterial communities for phosphorus acquisition. *Funct. Ecol.* 35, 1603–1619.
- Honvault, N., Houben, D., Lebrun, M., Vedere, C., Nobile, C., Guidet, J., Kervroëdan, L., Aubertin, M.-L., Rumpel, C., Faucon, M.-P., Dulaurent, A.-M., 2023. Positive or neutral effects of biochar-compost mixtures on earthworm communities in a temperate cropping system. *Appl. Soil Ecol.* 182, 104684. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104684>
- Honvault, N., Houben, D., Nobile, C., Firmin, S., Lambers, H., Faucon, M.-P., 2020. Tradeoffs among phosphorus-acquisition root traits of crop species for agroecological intensification. *Plant Soil* 461, 137–150.
- Honvault, N., Nobile, C., Faucon, M.-P., Firmin, S., Houben, D., 2022. Direct and indirect interactions between biochar properties, plant belowground traits, and plant performance. *GCB Bioenergy* 14, 1254–1265. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12993>
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Lu, X., Wen, D., 2018. Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Glob. Change Biol.* 24, 3344–3356. <https://doi.org/10.1111/gcb.14093>
- Houben, D., 2022. Le biochar: caractéristiques et applications agronomiques et environnementales, in: Campredon, S., Lobbedez, J., Perroud, S. (Eds.), *Charbonniers !. Alchimie entre art, mémoire et environnement*. Terres vivantes, Mens, France, pp. 94–106.
- Houben, D., Daoulas, G., Dulaurent, A.-M., 2021. Assessment of the Short-Term Fertilizer Potential of Mealworm Frass Using a Pot Experiment. *Front. Sustain. Food Syst.* 5, 714596.
- Houben, D., Daoulas, G., Faucon, M.-P., Dulaurent, A.-M., 2020. Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties. *Sci. Rep.* 10, 1–9.
- Houben, D., Evrard, L., Sonnet, P., 2013a. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass Bioenergy* 57, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.019>
- Houben, D., Evrard, L., Sonnet, P., 2013b. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere* 92, 1450–1457. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.055>
- Houben, D., Faucon, M.-P., Mercadal, A.-M., 2018. Response of Organic Matter Decomposition to No-Tillage Adoption Evaluated by the Tea Bag Technique. *Soil Syst.* 2.
- Houben, D., Hardy, B., Faucon, M.-P., Cornelis, J.-T., 2017. Effect of biochar on phosphorus bioavailability in an acidic silt loam soil. *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 21, 209–217.
- Houben, D., Meunier, C., Pereira, B., Sonnet, P., 2011. Predicting the degree of phosphorus saturation using the ammonium acetate-EDTA soil test. *Soil Use Manag.* 27, 283–293.
- Houben, D., Michel, E., Nobile, C., Lambers, H., Kandler, E., Faucon, M.-P., 2019. Response of phosphorus dynamics to sewage sludge application in an agroecosystem in northern France. *Appl. Soil Ecol.* 137, 178–186.
- Houben, D., Pircar, J., Sonnet, P., 2012. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability. *J. Geochem. Explor., Phytoremediation of polluted soils* 123, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.10.004>
- Houben, D., Sonnet, P., 2020. Metal immobilization and nitrate reduction in a contaminated soil amended with zero-valent iron (Fe⁰). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 201, 110868.
- Houben, D., Sonnet, P., 2015. Impact of biochar and root-induced changes on metal dynamics in the rhizosphere of *Agrostis capillaris* and *Lupinus albus*. *Chemosphere* 139, 644–651. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.036>
- Houben, D., Sonnet, P., 2012. Zinc mineral weathering as affected by plant roots. *Appl. Geochem.* 27, 1587–1592. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.05.004>
- Houben, D., Sonnet, P., Tricot, G., Mattioli, N., Couder, E., Opfergelt, S., 2014. Impact of root-induced mobilization of zinc on stable Zn isotope variation in the soil-plant system. *Environ. Sci. Technol.* 48, 7866–7873. <https://doi.org/10.1021/es5002874>
- Hu, Q., Jung, J., Chen, D., Leong, K., Song, S., Li, F., Mohan, B.C., Yao, Z., Prabhakar, A.K., Lin, X.H., Lim, E.Y., Zhang, L., Souradeep, G., Ok, Y.S., Kua, H.W., Li, S.F.Y., Tan, H.T.W., Dai, Y., Tong, Y.W., Peng, Y., Joseph, S., Wang, C.-H., 2021. Biochar industry to circular economy. *Sci. Total Environ.* 757, 143820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>
- Inyang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A.R., Pullammanappallil, P., Cao, X., 2012. Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass. *Bioresour. Technol.* 110, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.072>

- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A.C., Groenigen, J.W. van, Hungate, B.A., Verheijen, F., 2017. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environ. Res. Lett.* 12, 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- Jindo, K., Audette, Y., Higashikawa, F.S., Silva, C.A., Akashi, K., Mastrolonardo, G., Sánchez-Monedero, M.A., Mondini, C., 2020. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 7, 15. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>
- Jing, X., Sanders, N.J., Shi, Yu, Chu, H., Classen, A.T., Zhao, K., Chen, L., Shi, Yue, Jiang, Y., He, J.-S., 2015. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate. *Nat. Commun.* 6, 8159. <https://doi.org/10.1038/ncomms9159>
- Jones, D.L., 1998. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant Soil* 205, 25–44. <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312>
- Jones, D.L., Hinsinger, P., 2008. The rhizosphere: complex by design. *Plant Soil* 312, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9774-2>
- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T., Heikkinen, J., 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environ. Sci. Technol.* 49, 2115–2122. <https://doi.org/10.1021/es503387y>
- Keiluweit, M., Bougoure, J.J., Nico, P.S., Pett-Ridge, J., Weber, P.K., Kleber, M., 2015. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nat. Clim. Change* 5, 588–595. <https://doi.org/10.1038/nclimate2580>
- Kertész, Á., Madarász, B., 2014. Conservation Agriculture in Europe. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2, 91–96. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30016-2](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30016-2)
- Kervroëdan, L., Houben, D., Guidet, J., Dulaurent, A.-M., Marraccini, E., Deligey, A., Journel, C., Lamerre, J., Faucon, M.-P., 2022. Agri-environmental assessment of conventional and alternative bioenergy cropping systems promoting biomass productivity. *Front. Agric. Sci. Eng.*
- Kidd, P., Barceló, J., Bernal, M.P., Navari-Izzo, F., Poschenrieder, C., Shilev, S., Clemente, R., Monterroso, C., 2009. Trace element behaviour at the root–soil interface: Implications in phytoremediation. *Environ. Exp. Bot.* 67, 243–259. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.013>
- Kiem, R., Kögel-Knabner, I., 2002. Refractory organic carbon in particle-size fractions of arable soils II: organic carbon in relation to mineral surface area and iron oxides in fractions <6 µm. *Org. Geochem.* 33, 1699–1713. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00112-2)
- Kim, M.-S., Lee, S.-H., Kim, J.-G., 2021. Evaluation of factors affecting arsenic uptake by Brassica juncea in alkali soil after biochar application using partial least squares path modeling (PLS-PM). *Chemosphere* 275, 130095. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130095>
- Kramer, M.G., Sanderman, J., Chadwick, O.A., Chorover, J., Vitousek, P.M., 2012. Long-term carbon storage through retention of dissolved aromatic acids by reactive particles in soil. *Glob. Change Biol.* 18, 2594–2605. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02681.x>
- Lahmar, R., 2010. Adoption of conservation agriculture in Europe: Lessons of the KASSA project. *Land Use Policy, Soil and Water Conservation Measures in Europe* 27, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.02.001>
- Lampert, A., 2019. Over-exploitation of natural resources is followed by inevitable declines in economic growth and discount rate. *Nat. Commun.* 10, 1419. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09246-2>
- Lebrun, M., Védère, C., Honvault, N., Rumpel, C., Houben, D., 2023. Mixing ratio and Nitrogen fertilization drive synergistic effects between biochar and compost. *Nutr. Cycl. Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10320-x>
- Lehmann, J., 2009. Terra preta Nova—where to from here. *Amaz. Dark Earths Wim Sombroek's Vis.* 473–486.
- Lehmann, J., 2007. A handful of carbon. *Nature* 447, 143–144. <https://doi.org/10.1038/447143a>
- Lemanceau, P., Maron, P.-A., Mazurier, S., Mougél, C., Pivato, B., Plassart, P., Ranjard, L., Revellin, C., Tardy, V., Wipf, D., 2015. Understanding and managing soil biodiversity: a major challenge in agroecology. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 67–81. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0247-0>
- Lemhann, J., Joseph, S., 2015. Biochar for environmental management: an introduction, in: *Biochar for Environmental Management*. Routledge, pp. 1–14.
- Li, H., Mollier, A., Ziadi, N., Shi, Y., Parent, L.-É., Morel, C., 2017a. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. *Soil Tillage Res.* 165, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.002>
- Li, H., Mollier, A., Ziadi, N., Shi, Y., Parent, L.-É., Morel, C., 2017b. The long-term effects of tillage practice and phosphorus fertilization on the distribution and morphology of corn root. *Plant Soil* 412, 97–114. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2925-y>
- Li, H., Shen, J., Zhang, F., Clairrotte, M., Drevon, J.J., Le Cadre, E., Hinsinger, P., 2008. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. *Plant Soil* 312, 139–150. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9512-1>
- Liu, B., Li, Hongliang, Li, Hongbo, Zhang, A., Rengel, Z., 2021. Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching. *GCB Bioenergy* 13, 257–268. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12766>
- Liu, W., Sun, F., Lim, W.H., Zhang, J., Wang, H., Shiogama, H., Zhang, Y., 2018. Global drought and severe drought-affected populations in 1.5 and 2 °C warmer worlds. *Earth Syst. Dyn.* 9, 267–283. <https://doi.org/10.5194/esd-9-267-2018>

- Luo, Z., Wang, E., Sun, O.J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.08.006>
- Lwin, C.S., Seo, B.-H., Kim, H.-U., Owens, G., Kim, K.-R., 2018. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—a critical review. *Soil Sci. Plant Nutr.* 64, 156–167. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1440938>
- Ma, Z., Guo, D., Xu, X., Lu, M., Bardgett, R.D., Eissenstat, D.M., McCormack, M.L., Hedin, L.O., 2018. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature* 555, 94–97. <https://doi.org/10.1038/nature25783>
- Mariotte, P., Mehrabi, Z., Bezemer, T.M., De Deyn, G.B., Kulmatiski, A., Drigo, B., Veen, G.F. (Ciska), van der Heijden, M.G.A., Kardol, P., 2018. Plant–soil feedback: Bridging natural and agricultural sciences. *Trends Ecol. Evol.* 33, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.005>
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T.S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D.S., Wearing, C., Zhang, H., Haygarth, P.M., 2018. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant Soil* 427, 5–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>
- Mia, S., Dijkstra, F.A., Singh, B., 2017. Chapter One - Long-Term Aging of Biochar: A Molecular Understanding With Agricultural and Environmental Implications, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 1–51. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.001>
- Mikha, M.M., Rice, C.W., 2004. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 809–816. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.8090>
- Muscat, A., de Olde, E.M., Ripoll-Bosch, R., Van Zanten, H.H.E., Metze, T.A.P., Termeer, C.J.A.M., van Ittersum, M.K., de Boer, I.J.M., 2021. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nat. Food* 2, 561–566. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00340-7>
- Muukkonen, P., Hartikainen, H., Lahti, K., Särkelä, A., Puustinen, M., Alakukku, L., 2007. Influence of no-tillage on the distribution and lability of phosphorus in Finnish clay soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 120, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.012>
- Neubauer, U., Furrer, G., Schulin, R., 2002. Heavy metal sorption on soil minerals affected by the siderophore desferrioxamine B: the role of Fe(III) (hydr)oxides and dissolved Fe(III). *Eur. J. Soil Sci.* 53, 45–55. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00425.x>
- Neumann, G., Kandeler, E., 2023. Rhizosphere Management for More Productive and More Resilient Soil Systems, in: *Biological Approaches to Regenerative Soil Systems*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 333–344.
- Newman, R.H., Tate, K.R., 1980. Soil phosphorus characterisation by ³¹P nuclear magnetic resonance. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 11, 835–842. <https://doi.org/10.1080/001036280009367083>
- Nobile, C., Houben, D., Michel, E., Firmin, S., Lambers, H., Kandeler, E., Faucon, M.-P., 2019. Phosphorus-acquisition strategies of canola, wheat and barley in soil amended with sewage sludges. *Sci. Rep.* 9, 1–11.
- Nobile, C., Lebrun, M., Védère, C., Honvault, N., Aubertin, M.-L., Faucon, M.-P., Girardin, C., Houot, S., Kervroëdan, L., Dulaurent, A.-M., Rumpel, C., Houben, D., 2022. Biochar and compost addition increases soil organic carbon content and substitutes P and K fertilizer in three French cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 119. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00848-7>
- Novotny, E.H., Hayes, M.H., Madari, B.E., Bonagamba, T.J., Azevedo, E.R. de Souza, A.A. de, Song, G., Nogueira, C.M., Mangrich, A.S., 2009. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of charcoal for soil amendment. *J. Braz. Chem. Soc.* 20, 1003–1010.
- Opfergelt, S., Cornélis, J.T., Houben, D., Givron, C., Burton, K.W., Mattielli, N., 2017. The influence of weathering and soil organic matter on Zn isotopes in soils. *Chem. Geol.* 466, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.002>
- Paetsch, L., Mueller, C.W., Kögel-Knabner, I., von Lützw, M., Girardin, C., Rumpel, C., 2018. Effect of in-situ aged and fresh biochar on soil hydraulic conditions and microbial C use under drought conditions. *Sci. Rep.* 8, 6852. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25039-x>
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., Grace, P., 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agric. Ecosyst. Environ., Evaluating conservation agriculture for small-scale farmers in Sub-Saharan Africa and South Asia* 187, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
- Pang, J., Bansal, R., Zhao, H., Bohuon, E., Lambers, H., Ryan, M.H., Ranathunge, K., Siddique, K.H.M., 2018. The carboxylate-releasing phosphorus-mobilizing strategy can be proxied by foliar manganese concentration in a large set of chickpea germplasm under low phosphorus supply. *New Phytol.* 219, 518–529. <https://doi.org/10.1111/nph.15200>
- Park, H.J., Dong, J.-I., Jeon, J.-K., Park, Y.-K., Yoo, K.-S., Kim, S.-S., Kim, J., Kim, S., 2008. Effects of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of Japanese larch. *Chem. Eng. J.* 143, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.12.031>
- Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Daroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.-I., Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Litrico, I., Martin, M., Menasseri-Aubry, S., Meziere, D., Morvan, T., Mosnier, C., Roger-Estrade, J., Saint-André, L., Sierra, J., Therond, O., Viaud, V., Gâteau, R., Le Perchec, S., Savini, I., Rechauchère, O., 2020. Stocker du carbone dans les sols

- français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? (Other). INRA.
<https://doi.org/10.15454/nhxt-gn38>
- Postma-Blaauw, M.B., de Goede, R.G.M., Bloem, J., Faber, J.H., Brussaard, L., 2010. Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification. *Ecology* 91, 460–473.
<https://doi.org/10.1890/09-0666.1>
- Pourret, O., Houben, D., 2018. Characterization of metal binding sites onto biochar using rare earth elements as a fingerprint. *Heliyon* 4, e00543.
- Ramalho, B., Dieckow, J., Barth, G., Simon, P.L., Mangrich, A.S., Brevilieri, R.C., 2020. No-tillage and ryegrass grazing effects on stocks, stratification and lability of carbon and nitrogen in a subtropical Umbric Ferralsol. *Eur. J. Soil Sci.* 71, 1106–1119. <https://doi.org/10.1111/ejss.12933>
- Razzaghi, F., Obour, P.B., Arthur, E., 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma* 361, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>
- Reichard, P.U., Kretschmar, R., Kraemer, S.M., 2007. Dissolution mechanisms of goethite in the presence of siderophores and organic acids. *Geochim. Cosmochim. Acta, Physical Chemistry of Soils and Aquifers: A Special Issue in Honor of Garrison Sposito* 71, 5635–5650. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.12.022>
- Richardson, A.E., Lynch, J.P., Ryan, P.R., Delhaize, E., Smith, F.A., Smith, S.E., Harvey, P.R., Ryan, M.H., Veneklaas, E.J., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R.A., Simpson, R.J., 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil* 349, 121–156. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>
- Richardson, A.E., Simpson, R.J., 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiol.* 156, 989–996. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- Saavedra, C., Velasco, J., Pajuelo, P., Perea, F., Delgado, A., 2007. Effects of tillage on phosphorus release potential in a Spanish Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 56–63. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0162>
- Schipanski, M.E., Barbercheck, M., Douglas, M.R., Finney, D.M., Haider, K., Kaye, J.P., Kemanian, A.R., Mortensen, D.A., Ryan, M.R., Tooker, J., White, C., 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agric. Syst.* 125, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.11.004>
- Schmidt, M.J., Goldberg, S.L., Heckenberger, M., Fausto, C., Franchetto, B., Watling, J., Lima, H., Moraes, B., Dorshow, W.B., Toney, J., Kuikuro, Yamalui, Waura, K., Kuikuro, H., Kuikuro, T.W., Kuikuro, T., Kuikuro, Yahila, Kuikuro, A., Teixeira, W., Rocha, B., Honorato, V., Tavares, H., Magalhães, M., Barbosa, C.A., da Fonseca, J.A., Mendes, K., Alleoni, L.R.F., Cerri, C.E.P., Arroyo-Kalin, M., Neves, E., Perron, J.T., 2023. Intentional creation of carbon-rich dark earth soils in the Amazon. *Sci. Adv.* 9, eadh8499. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8499>
- Scholes, M.C., Scholes, R.J., 2013. Dust Unto Dust. *Science* 342, 565–566. <https://doi.org/10.1126/science.1244579>
- Schroder, J., Cordell, D., Smit, A., Rosemarin, A., 2010. Sustainable use of phosphorous, *Plant Research International, Report* 357. Plant Research International, Wageningen, NL.
- Shetty, R., Vidya, C.S.-N., Prakash, N.B., Lux, A., Vaculík, M., 2021. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Sci. Total Environ.* 765, 142744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1350–1358. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351350x>
- Smith, P., Cotrufo, M.F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P.J., Elliott, J.A., McDowell, R., Griffiths, R.I., Asakawa, S., Bustamante, M., House, J.I., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Gerber, J.S., Clark, J.M., Adhya, T., Scholes, R.J., Scholes, M.C., 2015. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *SOIL* 1, 665–685. <https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>
- Smith, R.G., Atwood, L.W., Warren, N.D., 2014. Increased productivity of a cover crop mixture is not associated with enhanced agroecosystem services. *PLOS ONE* 9, e97351. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097351>
- Smith, S.E., Smith, F.A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annu. Rev. Plant Biol.* 62, 227–250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R., 2010. Chapter 2 - A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil, in: *Advances in Agronomy, Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Souza, J.L.B., Antonangelo, J.A., Zhang, H., Reed, V., Finch, B., Arnall, B., 2023. Impact of long-term fertilization in no-till on the stratification of soil acidity and related parameters. *Soil Tillage Res.* 228, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105624>
- Sparks, D.L., 2001. Elucidating the fundamental chemistry of soils: past and recent achievements and future frontiers. *Geoderma, Developments and Trends in Soil Science* 100, 303–319. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00026-X)
- Steiner, C., Harttung, T., 2014. Biochar as a growing media additive and peat substitute. *Solid Earth* 5, 995–999. <https://doi.org/10.5194/se-5-995-2014>
- Suliman, S., Mühling, K.H., 2021. Utilization of soil organic phosphorus as a strategic approach for sustainable agriculture. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 184, 311–319. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100057>

- Sun, D., Li, K., Bi, Q., Zhu, J., Zhang, Q., Jin, C., Lu, L., Lin, X., 2017. Effects of organic amendment on soil aggregation and microbial community composition during drying-rewetting alternation. *Sci. Total Environ.* 574, 735–743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.112>
- Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., Chen, H., Yang, L., 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chem. Eng. J.* 240, 574–578. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.081>
- Takagi, S., Nomoto, K., Takemoto, T., 1984. Physiological aspect of mugineic acid, a possible phytosiderophore of graminaceous plants. *J. Plant Nutr.* 7, 469–477. <https://doi.org/10.1080/01904168409363213>
- Tang, X., Zhang, C., Yu, Y., Shen, J., van der Werf, W., Zhang, F., 2021. Intercropping legumes and cereals increases phosphorus use efficiency; a meta-analysis. *Plant Soil* 460, 89–104. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04768-x>
- Tebrügge, F., Düring, R.-A., 1999. Reducing tillage intensity — a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Tillage Res.* 53, 15–28. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00073-2)
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Tilman, D., Wedin, D., Knops, J., 1996. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature* 379, 718–720. <https://doi.org/10.1038/379718a0>
- Tomich, T.P., Brodt, S., Ferris, H., Galt, R., Horwath, W.R., Kebreab, E., Leveau, J.H.J., Liptzin, D., Lubell, M., Merel, P., Michelsmore, R., Rosenstock, T., Scow, K., Six, J., Williams, N., Yang, L., 2011. Agroecology: A Review from a Global-Change Perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 36, 193–222. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012110-121302>
- Toop, T.A., Ward, S., Oldfield, T., Hull, M., Kirby, M.E., Theodorou, M.K., 2017. AgroCycle – developing a circular economy in agriculture. *Energy Procedia, Proceedings of 1st International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains including Symposium on Heat Recovery and Efficient Conversion and Utilisation of Waste Heat ICSEF 2017*, 19-20 April 2017, Windsor UK 123, 76–80. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.269>
- Turner, B.L., Papházy, M.J., Haygarth, P.M., Mckelvie, I.D., 2002. Inositol phosphates in the environment. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 357, 449–469. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0837>
- Turpault, M.-P., Nys, C., Calvaruso, C., 2009. Rhizosphere impact on the dissolution of test minerals in a forest ecosystem. *Geoderma* 153, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.023>
- Uchimiya, M., Lima, I.M., Thomas Klasson, K., Chang, S., Wartelle, L.H., Rodgers, J.E., 2010. Immobilization of heavy metal ions (CdII, NiII, and PbII) by broiler litter-derived biochars in water and soil. *J. Agric. Food Chem.* 58, 5538–5544. <https://doi.org/10.1021/jf9044217>
- van der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D., van Straalen, N.M., 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* 11, 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>
- Van Vuuren, D.P., Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., 2010. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Glob. Environ. Change, Governance, Complexity and Resilience* 20, 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004>
- Vandecasteele, B., Similon, L., Moelants, J., Hofkens, M., Visser, R., Melis, P., 2023. End-of-life stage of renewable growing media with biochar versus spent peat or mineral wool. *Nutr. Cycl. Agroecosystems.* <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10315-8>
- Védère, C., Lebrun, M., Honvault, N., Aubertin, M.-L., Girardin, C., Garnier, P., Dignac, M.-F., Houben, D., Rumpel, C., 2022. How does soil water status influence the fate of soil organic matter? A review of processes across scales. *Earth-Sci. Rev.* 234, 104214. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104214>
- Voisin, A.-S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M.-H., Magrini, M.-B., Meynard, J.-M., Mougél, C., Pellerin, S., Pelzer, E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 361–380. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0189-y>
- Von Liebig, J., 1878. *Chemische briefe*. Thür. Universitäts- und Landesbibliothek.
- Vos, H.M.J., Zweig, R., Margenot, A.J., Koopmans, G.F., van Groenigen, J.W., 2023. Phosphatase activity in the drilosphere and its link to phosphorus uptake by grass. *Geoderma* 439, 116690. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116690>
- Wagg, C., Bender, S.F., Widmer, F., van der Heijden, M.G.A., 2014. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- Wang, D., Li, C., Parikh, S.J., Scow, K.M., 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. *Geoderma* 340, 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.012>
- Wang, L., O'Connor, D., Rinklebe, J., Ok, Y.S., Tsang, D.C.W., Shen, Z., Hou, D., 2020. Biochar aging: Mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications. *Environ. Sci. Technol.* 54, 14797–14814. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04033>
- Wang, L., Rengel, Z., Zhang, K., Jin, K., Lyu, Y., Zhang, L., Cheng, L., Zhang, F., Shen, J., 2022. Ensuring future food security and resource sustainability: insights into the rhizosphere. *iScience* 25, 104168. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104168>
- Wang, Y., Lambers, H., 2020. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives. *Plant Soil* 447, 135–156. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03972-8>

- Wang, Yu, Huang, Y., Song, L., Yuan, J., Li, W., Zhu, Y., Chang, S.X., Luo, Y., Ciais, P., Peñuelas, J., Wolf, J., Cade-Menun, B.J., Hu, S., Wang, L., Wang, D., Yuan, Z., Wang, Yujun, Zhang, J., Tao, Y., Wang, S., Liu, G., Yan, X., Zhu, C., 2023. Reduced phosphorus availability in paddy soils under atmospheric CO₂ enrichment. *Nat. Geosci.* 16, 162–168. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01105-y>
- Watson, C., Houben, D., Wichern, F., 2022. Editorial: Frass: The Legacy of Larvae—Benefits and Risks of Residues From Insect Production. *Front Sustain Food Syst* 6 889004 Doi 103389fsufs.
- Weidhuner, A., Hanauer, A., Krausz, R., Crittenden, S.J., Gage, K., Sadeghpour, A., 2021. Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years. *Soil Tillage Res.* 208, 104878. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104878>
- Wendling, M., Büchi, L., Amossé, C., Sinaj, S., Walter, A., Charles, R., 2016. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant Soil* 409, 419–434. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2974-2>
- Wenzel, W.W., Oburger, E., Puschenreiter, M., Santner, J., 2011. Trace Element Biogeochemistry in the Rhizosphere, in: Dynamics and Bioavailability of Heavy Metals in the Rootzone. CRC Press.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 503–515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Wezel, A., Soldat, V., 2009. A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology. *Int. J. Agric. Sustain.* 7, 3–18. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0400>
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.* 1, 56. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Xiang, Y., Deng, Q., Duan, H., Guo, Y., 2017. Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* 9, 1563–1572. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12449>
- Xu, H., Cai, A., Wu, D., Liang, G., Xiao, J., Xu, M., Colinet, G., Zhang, W., 2021. Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil Tillage Res.* 213, 105125. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105125>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S.N., Mohd Yusof, M.L., Ghosh, S., Chen, Z., 2020. Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Front. Plant Sci.* 11.
- Yu, G., Xiao, J., Hu, S., Polizzotto, M.L., Zhao, F., McGrath, S.P., Li, H., Ran, W., Shen, Q., 2017. Mineral availability as a key regulator of soil carbon storage. *Environ. Sci. Technol.* 51, 4960–4969. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00305>
- Yuan, Y., Zhao, W., Zhang, Z., Xiao, J., Li, D., Liu, Q., Yin, H., 2018. Impacts of oxalic acid and glucose additions on N transformation in microcosms via artificial roots. *Soil Biol. Biochem.* 121, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.002>
- Zaman, C.Z., Pal, K., Yehye, W.A., Sagadevan, S., Shah, S.T., Adebisi, G.A., Marlina, E., Rafique, R.F., Johan, R.B., Zaman, C.Z., Pal, K., Yehye, W.A., Sagadevan, S., Shah, S.T., Adebisi, G.A., Marlina, E., Rafique, R.F., Johan, R.B., 2017. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste, in: Pyrolysis. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69036>
- Zhang, D., Yan, M., Niu, Y., Liu, X., van Zwieten, L., Chen, D., Bian, R., Cheng, K., Li, L., Joseph, S., Zheng, Jinwei, Zhang, X., Zheng, Jufeng, Crowley, D., Filley, T.R., Pan, G., 2016. Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? *Agric. Ecosyst. Environ.* 226, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.010>
- Zhang, K., Zheng, D., Gu, Y., Xu, J., Wang, M., Mu, B., Wen, S., Tang, T., Rengel, Z., Shen, J., 2023. Utilizing soil organic phosphorus for sustainable crop production: insights into the rhizosphere. *Plant Soil.* <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06136-x>
- Zhang, Y., Dalal, R.C., Bhattacharyya, R., Meyer, G., Wang, P., Menzies, N.W., Kopittke, P.M., 2021. Effect of long-term no-tillage and nitrogen fertilization on phosphorus distribution in bulk soil and aggregates of a Vertisol. *Soil Tillage Res.* 205, 104760. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104760>

Résumé

L'optimisation du fonctionnement des agroécosystèmes représente un défi majeur à l'heure où la pression croissante sur les ressources naturelles et la nécessité de répondre aux besoins alimentaires mondiaux imposent une gestion plus efficiente et durable des terres agricoles. Dans ce contexte, l'un des objectifs de la transition agroécologique est de favoriser le bouclage des grands cycles en promouvant l'augmentation de la biodiversité et la substitution des intrants minéraux par des matières fertilisantes issues de ressources renouvelables. Cependant, compte tenu de la multiplicité des interactions biotiques et abiotiques opérant au sein du système sol-plante, l'acquisition de nouvelles connaissances sur les régulations biologiques et physico-chimiques des cycles biogéochimiques est requise afin d'être en mesure de quantifier et de prédire les intérêts et les limites des pratiques et techniques de culture innovantes et de mettre en place une gestion avisée des ressources pédologiques.

Dans ce mémoire, je m'attèle dans un premier temps à décrire l'évolution de mes réflexions sur la prise en compte des processus opérant au sein du système sol-plante en vue de concevoir des agroécosystèmes multifonctionnels et durables. Plus spécifiquement, je fais état de mes principales recherches sur la compréhension des processus rhizosphériques impliqués dans la mobilisation du phosphore et de leurs implications pour l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les sols. Puis, j'aborde la question de l'utilisation de co-produits industriels ou agricoles comme amendements multifonctionnels pour les sols. J'illustre ma démarche en accordant un intérêt particulier au biochar, objet de mes recherches depuis ma thèse jusqu'à aujourd'hui, et à ses effets sur le fonctionnement du système sol-plante.

Dans un second temps, je propose un projet de recherche basé sur une amélioration de la compréhension des processus biogéochimiques opérant au sein du système sol-plante à travers une approche holistique gravitant autour de trois piliers de l'agroécologie et de l'agriculture de conservation, à savoir le recyclage des nutriments au moyen d'amendements organiques, la réduction du travail du sol et l'implantation d'un couvert, en particulier diversifié en espèces. La démarche proposée dans ce projet se veut de complexité croissante : elle propose d'étudier les interactions sol-plante et leurs conséquences sur le fonctionnement du sol en réponse à l'apport d'amendements, puis aborde la question du travail du sol et de la stratification de la disponibilité en nutriments sur ces interactions et se clôture par l'intégration de la complexité de ces interactions dans les systèmes diversifiés en espèces végétales. Un exemple de perspectives à ces études termine ce projet en soulignant la nécessité d'étudier le couplage des cycles biogéochimiques à travers leurs liens directs et indirects afin de maximiser la fourniture de service écosystémiques par les sols et les agroécosystèmes.