



Département
AgroEcoSystem

INRAE



Faits marquants 2021

Agronomie et sciences de l'environnement pour les agroécosystèmes

Agronomy for Sustainable Development, une revue INRAE qui cultive l'excellence.....	p.4
Caractérisation des facteurs de la résilience des exploitations bovines et ovines laitières biologiques françaises....	p.6
Evaluation des performances de pratiques agroécologiques sur le Bassin Adour-Garonne : synthèse du programme BAG'AGES.....	p.9
L'impact du changement climatique sur la productivité de l'agriculture de conservation.....	p.12
Évaluer numériquement les impacts du changement climatique au sein d'un bassin viticole pour co-construire des stratégies d'adaptation.....	p.14
MAELAB : une entreprise pour la modélisation et l'évaluation intégrée des systèmes de bioéconomie territoriale.....	p.17
L'azote : un élément clé pour le développement de l'agriculture biologique.....	p.19
L'objectif 4 pour 1000 est-il atteignable dans les sols français ? Une approche fondée sur le bilan carbone et l'évaluation de la saturation en carbone des sols.....	p.21
Evaluer le carbone stocké par les haies dans le compartiment sol.....	p.23
ResidueGas : Estimation de la contribution des résidus végétaux aux émissions de N ₂ O des sols et importance de la maturité physiologique des biomasses recyclées.....	p.25
Evaluation du potentiel de transfert des pesticides vers l'atmosphère à partir de leurs propriétés moléculaires....	p.28
Répartition des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols métropolitains et risques sanitaires associés	p.30
Evaluation des composés perfluorés émergents dans divers produits résiduels organiques : intérêt d'un réseau de sites d'observation de longue durée.....	p.32
L'analyse du cycle de vie pour évaluer l'efficacité environnementale de la réutilisation de l'eau.....	p.34
Le rapport isotopique carbone 13 / carbone 12 dans les jus de raisin pour estimer le réservoir utile en eau des sols viticoles.....	p.36
Effets positifs, directs et hérités, de l'introduction de prairies temporaires sur la conservation de la biodiversité des sols et les services écosystémiques.....	p.38

Sommaire >

Le rôle des oiseaux sur les régulations biologiques des insectes en grandes cultures.....	p.41
Des indicateurs pour quantifier la contribution des adventices aux services écosystémiques.....	p.43
Déterminants paysagers des bioagresseurs des grandes cultures à large échelle.....	p.45
Diversifier les cultures booste la production, la biodiversité et les services écosystémiques.....	p.47
Sélection artificielle de microbiotes rhizosphériques pour améliorer la croissance des plantes.....	p.49
Diversité fonctionnelle des cultures de diversification : des caractères phénotypiques des légumineuses à graines prédisent les compromis entre services agro-écosystémiques.....	p.51
Contribution à la conception et à la rédaction d'un handbook sur l'écologie racinaire.....	p.54
Le rafraîchissement des villes par les arbres – Le projet COOLTREES.....	p.56



Agronomy for Sustainable Development, une revue INRAE qui cultive l'excellence...

***Agronomy for Sustainable Development (ASD)* est une revue scientifique INRAE de portée internationale, publiée par Springer Nature. Son objectif est de relier les recherches sur l'agronomie, les cultures et les systèmes agricoles aux sciences écologiques, environnementales, économiques ou sociales. Ce journal publie des articles originaux de recherche, des méta-analyses, et des articles de synthèse présentant une évaluation critique de sujets émergents ou contribuant clairement à répondre à des questions scientifiques largement débattues. La revue a récemment fait évoluer son domaine thématique (scope), pour affirmer son interdisciplinarité et son positionnement original autour de l'agroécologie, des recherches participatives et de l'agronomie systémique. Trois éditeurs-en-chef INRAE portent l'évolution des orientations scientifiques, renforcent le comité éditorial international et intensifient l'exigence du processus éditorial, ce qui permet à la revue de poursuivre sa progression en terme d'audience scientifique internationale, et de se classer actuellement dans les deux premières revues mondiales de son domaine disciplinaire.**



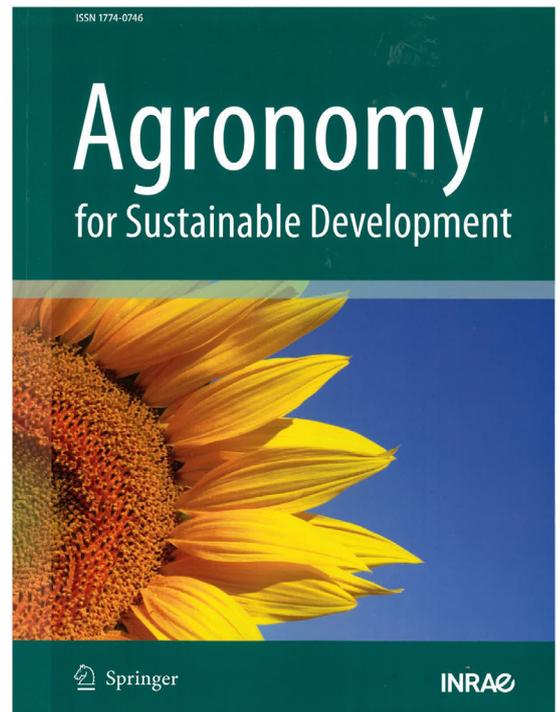
CONTEXTE ET ENJEUX

Au niveau mondial, en 20 ans, l'accroissement spectaculaire du nombre d'articles scientifiques soumis et publiés a conduit à la multiplication des revues, au développement de stratégies d'attractivité des meilleurs auteurs et articles, et à l'évolution et la diversification des procédures d'évaluation et de publication. ASD, revue historique INRAE dans le domaine de l'agronomie, actuellement diffusée par *Springer Nature*, s'est adaptée à ces évolutions, et a progressé constamment depuis une quinzaine d'années en termes d'attractivité (nombres d'articles soumis) et d'audience (citations des articles publiés). Les trois éditeurs-en-chef qui pilotent actuellement la revue et son positionnement thématique sont des chercheurs INRAE rattachés aux départements AgroEcoSystem et ACT. Leur mission exprime l'investissement et la volonté de ces départements de défendre au niveau international, les approches systémiques et interdisciplinaires de l'agronomie qui constituent la force et l'originalité de la recherche française dans ce domaine.



RÉSULTATS

La revue *Agronomy for Sustainable Development (ASD)*, rassemble une cinquantaine de scientifiques éditeurs associés originaires de 17 pays, autour de trois éditeurs et éditrice-en-chef et d'une coordinatrice éditoriale INRAE. ASD attire environ 700 propositions d'articles de tous les pays et publie entre 60 et 80 articles par an. ASD a fait récemment évoluer son champ thématique (scope), pour l'inscrire plus clairement dans les domaines de l'agroécologie, de l'agronomie systémique et des recherches participatives. La revue promeut ainsi l'interdisciplinarité en se positionnant dans les interfaces entre agronomie et écologie, économie, sciences sociales, avec l'ambition



d'attirer et publier les recherches les plus originales, ou engageant clairement les auteurs sur des fronts de science faisant débat. Ses différents formats de publication, la possibilité de confier désormais des numéros thématiques virtuels à des éditeurs invités, son statut de journal ami de l'organisation « *Peer-Community In* » sont au service de cette ambition. Les facteurs d'impact (IF) à deux et cinq ans (Clarivate) augmentent depuis 15 ans et traduisent les exigences déployées sur la qualité scientifique et éditoriale des articles publiés ; en atteignant 5,832 (IF 2 ans) et 9,354 (IF 5 ans) à l'issue de l'année 2020, ces indicateurs placent ASD à la 2e place derrière une revue qui ne publie que des articles de synthèse (base IF 2 ans), et à la 1^{ère} place de la catégorie « Agronomy » (base IF 5 ans). Le facteur d'impact à 5 ans d'ASD, sensiblement supérieur aux autres revues de la catégorie, est un indicateur de la bonne longévité des résultats publiés par ASD.

PERSPECTIVES

La revue ASD est partie prenante de la dynamique impulsée par la Direction pour la Science Ouverte (DipSO) pour les quatre revues dont INRAE est propriétaire. Ceci devrait se traduire dans l'avenir par un accroissement de l'accès libre aux articles (open access) et la transparence du processus d'évaluation (open review, modalités à l'étude), en accord avec les priorités de l'institut dans son engagement pour la science ouverte.

VALORISATION

La revue a un positionnement résolument international et peut offrir une vitrine aux recherches française en agronomie. Les articles associant des auteurs INRAE ont représenté 26% des publications de la revue sur les 5 dernières années.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721076105?via%3DiHub>
- > Site web : <https://www.springer.com/journal/13593>
- > Blog : <https://ist.blogs.inrae.fr/agronomy/>
- > Twitter : https://twitter.com/ASD_INRAE



Contacts : S. Recous, J. Le Bot, J-M. Meynard, A. Beliaeff

Unités : UMR FARE Reims, UR PSH Avignon, UMR SADAPT Thiverval-Grignon

Départements : AgroEcoSystem, ACT + DipSO

Centres INRAE : Grand-Est Nancy, PACA, IdF Versailles-Grignon

Mots clés : Agronomie, agroécologie, interdisciplinarité, revue scientifique



Caractérisation des facteurs de la résilience des exploitations bovines et ovines laitières biologiques françaises

Les exploitations bovines et ovines laitières biologiques évoluent dans un contexte incertain et risqué caractérisé par de multiples perturbations climatiques, économiques, sanitaires, etc. Ce contexte pose la question de leur résilience, c'est-à-dire de leur capacité à faire face à ces perturbations. Cette thèse visait à caractériser les facteurs de la résilience des élevages laitiers biologiques. Quatre dispositifs ont permis de croiser analyses qualitatives et quantitatives de cette résilience, en adoptant une approche globale et interdisciplinaire. Plusieurs facteurs de résilience ont été mis en évidence parmi lesquels l'orientation vers des systèmes herbagers autonomes et économes, la cohérence dans la gestion des ressources naturelles et humaines (par ex. équilibre sol-troupeau, troupeau-main d'œuvre), l'insertion dans une filière bien structurée, l'assurance de prix stables et rémunérateurs. Ils interrogent les facteurs plus communément admis dans la littérature scientifique comme la diversification des productions. L'originalité de ce travail réside dans l'importance accordée au point de vue des éleveurs, aux trajectoires des exploitations agricoles, et dans le lien explicite fait entre résilience et organisation du travail sur les exploitations.



CONTEXTE ET ENJEUX

Les filières lait de vache et lait de brebis biologiques sont en plein essor depuis le début des années 2010. Pendant une dizaine d'années, les élevages laitiers biologiques ont évolué dans un contexte propice marqué notamment par des prix du lait stables et rémunérateurs. Ces élevages doivent aujourd'hui faire face à un ensemble de perturbations : épisodes climatiques extrêmes de plus en plus fréquents et impactants, dérégulations du marché, augmentation du prix des intrants, etc. Cette multiplicité de perturbations pose la question de la résilience de ces élevages, c'est-à-dire de leur capacité à faire face à ces perturbations. Dans ces conditions, cette thèse visait à mettre en évidence pour et avec les acteurs de terrain (agriculteurs, conseillers agricoles) des facteurs de résilience des élevages bovins et ovins laitiers ayant suffisamment de recul en production biologique (i.e. 5 ans ou plus). Pour cela, il convenait de relever plusieurs défis méthodologiques : (i) évaluer la résilience générale (c'est-à-dire face à une diversité de perturbations) des exploitations laitières biologiques en considérant leurs dynamiques, (ii) intégrer le point de vue des éleveurs, (iii) intégrer la question du travail, de ses conditions et de son organisation, dans l'évaluation de la résilience.



RÉSULTATS

Des entretiens conduits auprès d'éleveurs ont permis de comprendre leur perception de la résilience. Ce travail a mis en évidence un ensemble d'indicateurs (i.e. éléments permettant de mesurer, par ex. l'autonomie et la viabilité de l'exploitation) et de facteurs (i.e. éléments favorisant par ex. la cohérence dans la gestion des ressources naturelles et humaines) de la résilience à dire d'éleveurs, pour les deux filières. Un autre dispositif de recherche a permis de croiser l'évolution des structures d'exploitation (e.g. main d'œuvre, surfaces) et des pratiques mises en place (gestion du troupeau, des surfaces, etc.) avec l'évolution de la satisfaction des éleveurs prise comme indicateur de la résilience des exploitations. L'analyse quantitative conduite sur un échantillon de 85 exploitations bovines et 36 exploitations ovines a permis de mettre en évidence des facteurs de résilience générale comme la diminution de la part de maïs au profit du pâturage sur les exploitations bovines ou comme l'augmentation de la productivité individuelle sur les exploitations ovines. Les résultats de cette analyse quantitative ont permis de confirmer et compléter ceux de l'analyse qualitative. Un dispositif original d'observation participante a mis

en évidence un ensemble de traits d'organisation (planifier et décider à plusieurs, aménager les bâtiments et les équipements, etc.) qui, dans une étude exploratoire, semblent participer à la construction de la résilience des élevages bovins laitiers biologiques. Enfin, une enquête en ligne combinée à des entretiens individuels ont permis de démontrer la résilience des exploitations et de la filière laitière bovine biologique à la première phase de confinement liée à la pandémie de Covid-19 grâce notamment à l'autonomie alimentaire des exploitations et leur faible dépendance à une main d'œuvre extérieure, ou à l'agilité et la flexibilité de la filière pour se réorganiser.

PERSPECTIVES

L'étude visant à relier travail et résilience et à mettre en évidence un ensemble de traits d'organisation du travail vecteurs de résilience va se poursuivre, de même que la diffusion des résultats auprès des utilisateurs de la recherche (éleveurs/conseillers/étudiants). Au plan scientifique, cette thèse a ouvert de nouvelles voies quant à la manière d'évaluer la résilience en agriculture tant en termes de méthodes (par ex. via le point de vue des éleveurs) que de dimensions considérées (par ex. le travail sur les exploitations).



a) Coffret pédagogique 'La résilience des exploitations laitières biologiques' créé avec Chloé Adelheim, designer, dans le cadre du projet CASDAR Résilait. A l'intérieur de chaque coffret, les trajectoires de 3 exploitations sont racontées et illustrées.

b) Une des trois trajectoires d'exploitation illustrées et racontées dans ce coffret afin d'exemplifier le concept de résilience. Les étudiants déplient progressivement l'accordéon et découvrent la trajectoire de l'exploitation. A chaque fois qu'apparaît une perturbation dans la narration, les étudiants tirent des cartes 'questions' qui les invitent à envisager et à proposer des solutions pour faire face à la perturbation en question. Ils peuvent s'aider d'autres cartes sur lesquelles sont renseignées un ensemble de données techniques et économiques qui permettent d'avoir une idée précise du fonctionnement de l'exploitation afin de proposer des solutions adaptées.

c) Cartes technico économiques et cartes questions permettant d'aiguiller les étudiants dans leur découverte de la trajectoire et dans leurs réflexions spécifiques à chacune des trois histoires.

VALORISATION

- > 4 articles scientifiques
- > 4 publications vulgarisées dans la presse agricole
- > Un outil pédagogique à destination des étudiants des formations agricoles et agronomiques allant du BTS ACSE au cursus ingénieur agronome et visant à aider à l'appréhension du concept de résilience. Ce coffret met les utilisateurs en situation de gestion de perturbations dans un élevage laitier au fil du temps par l'analyse de ces perturbations et la définition de solutions pour y faire face.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Perrin, A., R. Milestad, and G. Martin. 2020. Resilience applied to farming: organic farmers' perspectives. Ecology and Society 25(4):art5. <https://doi.org/10.5751/ES-11897-250405>
- > Perrin, A., M. S. Cristobal, R. Milestad, and G. Martin. 2020. Identification of resilience factors of organic dairy cattle farms. Agricultural

Systems 183:102875. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102875>

> Perrin, A., and G. Martin. 2021. Driving factors behind subjective resilience on organic dairy sheep farms. *Ecology and Society* 26(3):13. <https://doi.org/10.5751/ES-12583-260313>

> Perrin, A., and G. Martin. 2021. Resilience of French organic dairy cattle farms and supply chains to the Covid-19 pandemic. *Agricultural Systems* 190:103082. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103082>

> Ripoché, F., Perrin, A., Martin, G., 2021. Ovin laitiers, Quelle résilience pour les élevages ? *Biofil, la revue de l'agriculture bio*.

> Bancarel, A., Perrin, A., Martin, G., 2020. La résilience des élevages. Le programme de recherche résilait : comment adapter son système pour être plus solide face aux aléas ? *Pratiques Techniques Innovantes. Une publication des techniciens de l'APABA*.



Contacts : Augustine Perrin, Guillaume Martin

Unité : UMR AGIR

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Toulouse

Mots clés : Résilience, approche globale, agriculture biologique, élevage laitier



Evaluation des performances de pratiques agroécologiques sur le Bassin Adour-Garonne : synthèse du programme BAG'AGES

Le programme BAG'AGES avait pour objectif de mieux cerner les effets de leviers agroécologiques, mobilisés dans différents systèmes de culture notamment en agriculture de conservation, sur le fonctionnement de sols du Bassin Adour-Garonne et de quantifier leurs niveaux de performances agronomiques, économiques, sociales et environnementales aux échelles de la parcelle, de l'exploitation et du bassin versant. Doté d'un budget total de 5 millions d'euros, financé par l'Agence de l'eau Adour-Garonne et par la Région Occitanie, le programme, coordonné par INRAE, a rassemblé pendant 5 années (2016-2021) 20 partenaires de la recherche, du développement agricole, de l'enseignement et des organismes économiques et près de 60 agriculteurs. Le projet a notamment permis de mettre en évidence (i) les modifications fortes en terme de capacité d'infiltration qui sont plus élevées et plus stables dans le temps sur des sols conduits en agriculture de conservation (i.e. mobilisant diversification des cultures, couverture maximale des sols et réduction/suppression du travail du sol) ; (ii) un accroissement significatif des stocks de carbone dans les sols conduits avec différents leviers agroécologiques ; (iii) une amélioration du fonctionnement biologique des sols au travers de l'étude de la mycorrhization. Il a en outre permis de poursuivre des développements méthodologiques (iv) pour pouvoir identifier par analyse d'images satellitales la présence de couverts végétaux et estimer leur niveau de biomasse, afin de mieux cerner les retours de carbone dans les parcelles ; (v) pour mieux évaluer, par modélisation, les risques érosifs et l'impact des cultures intermédiaires sur l'hydrologie à l'échelle de bassins versants. Enfin, (vi) le suivi des performances économiques d'un réseau d'exploitations agricoles mobilisant à différents degrés des leviers agroécologiques met en évidence des niveaux de rentabilité équivalents à ceux obtenus dans les systèmes conventionnels du bassin.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les effets du changement climatique sur le bassin Adour-Garonne soulèvent des questions concernant l'adaptation des systèmes de culture en lien notamment avec la disponibilité en eau au moment des besoins des cultures, mais aussi sur la capacité des milieux à résister à des phénomènes de précipitations intenses dont la fréquence va augmenter et qui sont à l'origine de phénomènes érosifs importants. L'objectif principal du programme BAG'AGES était donc de quantifier les effets de pratiques agroécologiques (diversification des rotations des cultures, utilisation de couverts végétaux, agroforesterie, réduction/suppression du travail du sol) sur le fonctionnement global du système sol-plante en couplant expérimentation et modélisation, et ce à différentes échelles spatiales (de la parcelle au bassin versant), tout en évaluant les performances socioéconomiques des exploitations agricoles mettant en œuvre différents leviers agroécologiques.

RÉSULTATS

A l'échelle de la parcelle agricole, les capacités d'infiltration de l'eau en agriculture de conservation sont généralement plus élevées (de 2 à 8 fois) et plus stables dans le temps, à l'échelle d'une saison culturale, que celles mesurées sur parcelles labourées. Ces différences s'expliquent par une meilleure stabilité structurale du sol en lien avec l'accroissement des teneurs en carbone organique en surface du sol et par une meilleure connectivité du réseau poral sur l'ensemble du profil de sol, qui est ainsi plus performant dans la conduction de l'eau. Par ailleurs, l'activité de la macrofaune des sols (vers de terre notamment), plus intense en agriculture de conservation, est à l'origine d'un réseau de macropores capables de faire circuler l'eau lors d'épisodes pluvieux intenses, réduisant ainsi les risques de ruissellement de surface ou sub-surface. L'activité microbiologique, et notamment les populations mycorhiziennes, est également améliorée lorsque le sol n'est pas ou peu travaillé et qu'il est couvert par des plantes vivantes.

Sur certains types de sol (notamment sur sol limoneux de vallée alluviale), une augmentation du réservoir utile en eau des sols (RU) est également observée, en particulier dans les horizons de surface, traduisant notamment d'une évolution de la mésoporosité, gamme de pores impliqués dans la rétention d'eau disponible pour les plantes. Cet accroissement de rétention en eau des sols peut permettre aux cultures de mieux résister aux périodes de sécheresse et d'améliorer l'efficacité de l'eau en agriculture de conservation mais, à ce jour, cette hypothèse, soutenue par des observations d'agriculteurs, n'a pas pu être testée expérimentalement. Il a été démontré que l'introduction de cultures intermédiaires réduit le drainage d'environ 30 mm en moyenne et qu'elle pouvait ponctuellement réduire le stock d'eau du sol pour la culture suivante en cas de destruction tardive en climat sec. Les travaux de modélisation sur deux bassins versants, avec les modèles TNT2 et MAELIA, ont cependant permis de montrer que ces cultures avaient finalement peu d'effet sur les flux d'eau (débits des rivières) mais réduisaient significativement les fuites de nitrate (de l'ordre de 30% comparativement à des sols nus). Par ailleurs, l'érosion des sols est également réduite par une densification des haies.

PERSPECTIVES

Différentes publications scientifiques (et techniques) sont encore à produire à partir des données collectées sur ce projet. A court terme, un projet de recherche collaborative mobilisant une partie des productions de BAG'AGES et visant à accompagner la transition agroécologique des systèmes de production et de culture va être engagé entre les unités DYNAFOR, AGIR et BAGAP, sur un territoire choisi.

VALORISATION

- > Publications scientifiques : > 12 (Tribouillois et al., 2018b, a; Tribouillois et al., 2018c; Boinot, 2019; Boinot et al., 2019; Meyer et al., 2019; Cueff et al., 2020; Meyer, 2020; Meyer et al., 2020; Tribouillois et al., 2020; Cueff et al., 2021a; Cueff et al., 2021b)
- > Thèses de doctorat : 5 (BOINOT Sébastien (soutenue), BREIL Nicolas (en cours), CUEFF Sixtine (soutenue), MAES Arthur QuyManh (soutenue), MEYER Nicolas (soutenue))
- > Contribution aux réflexions sur politiques publiques : présentation de synthèse au colloque Eau et Agricultures du Grand Sud-Ouest, des Destins liés (organisé par l'AEAG, <https://eau-agriculturesgrandsudouest.fr/>)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Cueff, S., Alletto, L., Bourdat-Deschamps, M., Benoit, P., Pot, V., 2020. Water and pesticide transfers in undisturbed soil columns sampled

from a Stagnic Luvisol and a Vermic Umbrisol both cultivated under conventional and conservation agriculture. *Geoderma* 377, 114590.

> Cueff, S., Alletto, L., Dumeny, V., Benoit, P., Pot, V., 2021a. Adsorption and degradation of the herbicide nicosulfuron in a stagnic Luvisol and Vermic Umbrisol cultivated under conventional or conservation agriculture. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 15934-15946.

> Cueff, S., Coquet, Y., Aubertot, J.-N., Bel, L., Pot, V., Alletto, L., 2021b. Estimation of soil water retention in conservation agriculture using published and new pedotransfer functions. *Soil and Tillage Research* 209, 104967.

> Meyer, N., 2020. Evaluation de l'impact des cultures intermédiaires multi-services sur le bilan hydrique des sols : approche par expérimentation et simulation. Application au bassin Adour-Garonne. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, p. 208.

> Meyer, N., Bergez, J.E., Constantin, J., Belleville, P., Justes, E., 2020. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management. *Agricultural Water Management* 231.

> Tribouillois, H., Constantin, J., Guillon, B., Willaume, M., Aubrion, G., Fontaine, A., Hauprich, P., Kerveillant, P., Laurent, F., Therond, O., 2020. AqYield-N: A simple model to predict nitrogen leaching from crop fields. *Agricultural and Forest Meteorology* 284.

Photo page 9 : Un des 12 sites d'étude instrumentés du programme BAGAGES (Pyrénées-Atlantiques) comportant une parcelle labourée annuellement (à gauche) conduite en monoculture de maïs sans culture intermédiaire et une parcelle en agriculture de conservation (à droite) avec rotation triennale (maïs-soja-méteils), culture intermédiaire systématique et semis direct (depuis 2006).



Contacts : Lionel Alletto, Julie Constantin

Unité : UMR AGIR

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Toulouse

Mots clés : Agroécologie, fonctionnement hydrique, multiperformances, adaptation et atténuation du changement climatique



L'impact du changement climatique sur la productivité de l'agriculture de conservation

Particulièrement développée aux États-Unis, où elle permet notamment de lutter contre l'érosion hydrique et éolienne des sols, l'agriculture de conservation, également appelée agriculture de conservation des sols, connaît, depuis quelques années, un regain d'intérêt dans le monde agricole européen. Si l'intérêt de l'agriculture de conservation réside notamment dans sa capacité à stocker le carbone dans les sols, elle a longtemps eu mauvaise presse, accusée de conduire à des baisses de rendement. Un article récent, publié dans Nature Climate Change par une équipe de recherche AgroParisTech - INRAE, montre que ce système s'avère être souvent performant en grandes cultures dans des zones soumises à des stress hydriques importants, notamment dans les conditions climatiques futures.



Benoît Gabrielle, enseignant-chercheur à AgroParisTech, David Makowski et Yang Su, chercheurs à INRAE, comparent la productivité des systèmes d'agriculture de conservation et de leurs variantes aux systèmes basés sur le travail conventionnel des sols avec labour. Leur étude s'intéresse notamment à huit principales espèces cultivées dans les conditions climatiques actuelles et futures.

Pour étudier les évolutions futures dans un contexte de changement climatique, les scientifiques ont adopté une approche probabiliste à l'échelle mondiale afin de tenir compte de différentes sources d'incertitude. D'après Yang Su, « cette approche est à la fois originale et très performante car elle s'appuie sur l'utilisation de méthodes d'apprentissage automatique appliquées à plusieurs milliers de données expérimentales couvrant les principales régions agricoles du monde ».

Leurs travaux démontrent, dans la perspective du changement climatique, que l'agriculture de conservation a plus de chance d'augmenter les rendements dans les zones soumises à un stress hydrique. L'article met aussi en exergue que c'est une solution par rapport au manque d'eau dans les régions plus sèches. Selon Benoît Gabrielle « On observe de grandes différences dans la probabilité de gain ou de perte de rendement avec l'agriculture de conservation, en fonction de plusieurs facteurs : les types de cultures, les pratiques agricoles, les zones climatiques et les régions géographiques. La pleine application des trois principes de l'agriculture de conservation – couverture des sols, rotation des cultures et non-labour – joue également un rôle important au regard de la productivité. »

Les résultats montrent que, dans les conditions climatiques futures, les performances de l'agriculture de conservation devraient augmenter pour certaines cultures, notamment pour le maïs.

D'après David Makowski, « la forte variabilité de l'impact de l'agriculture de conservation sur la productivité des cultures explique en partie les controverses scientifiques concernant cette forme d'agriculture. En synthétisant les nombreux résultats expérimentaux produits par la communauté scientifique au cours des 30 dernières années, notre étude permet d'identifier les cultures et zones géographiques où l'agriculture de conservation a une forte probabilité d'être plus performante que les systèmes fondés sur un travail du sol conventionnel ».

Cette étude a été financée par l'Institut de Convergence CLAND de l'Université Paris-Saclay.

VALORISATION

> Ce fait marquant est issu d'un communiqué de presse INRAE, AgroParisTech et Cland du 18 juin 2021 : <https://www.inrae.fr/actualites/limpact-du-changement-climatique-productivite-lagriculture-conservation>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Su, Y., Gabrielle, B. & Makowski, D. The impact of climate change on the productivity of conservation agriculture. *Nat. Clim. Chang.* (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01075-w>



Contact : David Makowski

Unité : UMR MIA-Paris Mathématiques et Informatique Appliquées

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : IdF Versailles-Grignon

Mots clés : Agriculture de conservation, changement climatique, adaptation au changement climatique, productivité



Évaluer numériquement les impacts du changement climatique au sein d'un bassin viticole pour co-construire des stratégies d'adaptation

Les enjeux du changement climatique sont souvent présentés à l'échelle globale, alors que l'adaptation nécessite des connaissances sur ses impacts à une échelle locale. Une démarche originale combinant modélisation numérique et démarche participative a été mise en oeuvre au sein d'un bassin viticole méditerranéen dans le cadre du projet Laccave 2.21. Elle a consisté à (1) analyser les projections climatiques avec des acteurs, (2) quantifier à l'aide d'un modèle spatialisé les impacts de ces projections climatiques selon les sols et les systèmes de production, et (3) définir avec les acteurs les adaptations à mettre en oeuvre, simuler leurs impacts et les discuter. Les résultats de simulation ont montré une vulnérabilité accrue des systèmes viticoles à haut rendement, comparés aux systèmes en AOP. Des incertitudes subsistent concernant l'occurrence des événements extrêmes et l'effet de températures élevées. Les adaptations envisagées (ex : cépages tardifs, ombrage, réduction de densité de plantation, irrigation) ont été évaluées par simulation du point de vue de leur impact sur la phénologie, le rendement et la consommation d'eau, et du point de vue de leur coût. Leur faisabilité et leur acceptabilité ont été évaluées à partir de connaissances expertes.



CONTEXTE ET ENJEUX

Dans les décennies à venir, la viticulture méditerranéenne fera face à des augmentations de températures et de déficits hydriques qui auront des impacts sur le rendement et la qualité de ses vins, et sur son environnement (ressource en eau, biodiversité) (Ollat et Touzard, 2014). L'évaluation quantitative de ces impacts est généralement menée par des simulations à des échelles spatiales larges, sans prendre en compte l'hétérogénéité des contextes pédo-climatiques et socio-économiques qui déterminent pourtant la vulnérabilité des systèmes

viticoles au changement climatique. D'autres études s'appuient sur des processus participatifs mais elles se limitent à lister différents leviers d'adaptation envisagés par les acteurs sans en évaluer quantitativement les performances (Naulleau et al., 2021). C'est pourquoi notre démarche utilise un modèle numérique pour proposer, en accompagnement d'une réflexion sur les stratégies d'adaptation, une étude d'impacts du changement climatique et de stratégies d'adaptation qui fasse sens localement.

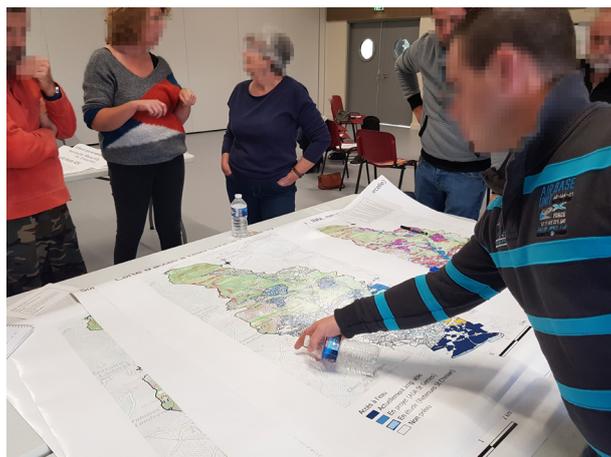
RÉSULTATS

Neuf acteurs locaux (syndicats d'AOP, cave coopérative, Etablissement public territorial de bassin et viticulteurs) et quatre acteurs régionaux (chambre d'agriculture, IFV, conseil départemental, AOP Languedoc) ont été sollicités pour échanger leurs perceptions des impacts du changement climatique et les actions envisagées, représenter la diversité locale (zonage à dire d'acteurs), échanger sur les résultats des simulations et hiérarchiser les adaptations proposées.

La plateforme OpenFLUID (Fabre et al., 2013) a permis l'évaluation spatialement explicite des impacts du changement climatique révélant l'hétérogénéité des situations du bassin versant, en fonction des conditions locales (sol et climat) et des systèmes de production viticole (AOP ou IGP, irrigués ou pluviaux). Les zones de production de vins en AOP subiraient moins de pertes de rendement que les zones à forte production (IGP).

Cependant, l'ensemble du bassin versant connaîtra des températures élevées, entraînant des risques sur la qualité de la récolte. Sur cette base, des stratégies d'adaptation ont été proposées et évaluées selon quatre axes : (1) retarder les vendanges en utilisant des cépages plus tardifs et en favorisant un microclimat plus frais l'été (haies, orientation des rangs, hauteurs de ceps), (2) améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau en associant à une augmentation des surfaces irriguées des mesures visant à réduire la consommation d'eau (gestion du rapport feuille/fruit, ombrage, mulch, réduction de la densité de plantation, cépages tolérants à la sécheresse), (3) renforcer l'exploration du réservoir utile du sol par la vigne en améliorant la qualité des sols, (4) relocaliser les plantations dans l'espace à une échelle locale.

Les simulations montrent que les effets cumulés de plusieurs leviers d'adaptation, diversement répartis dans le paysage, permettent de réduire les pertes de rendement dues au changement climatique pour la majorité des systèmes viticoles du bassin versant. La participation des acteurs à cette étude a permis la co-définition des stratégies d'adaptation, la spécification du modèle et de ses indicateurs d'évaluation, une communication directe des résultats de simulations ainsi que leur enrichissement par des indicateurs, qualitatifs sur la faisabilité et la souhaitabilité des leviers d'adaptation, et quantitatifs sur leur ratio coût/bénéfice.



Atelier d'analyse spatiale participative © A. Naulleau

PERSPECTIVES

Des développements sont envisagés dans deux directions. D'une part les modèles doivent progresser pour mieux représenter les effets de certaines évolutions climatiques (événements extrêmes, températures élevées) et de certaines adaptations (cépages, types de taille, amélioration de la qualité des sols). D'autre part, cette étude peut être complétée par l'analyse du contexte favorisant la mise en œuvre des leviers techniques identifiés, (réglementation, subvention, prix du marché, etc.) ainsi que leur pertinence vis-à-vis des enjeux sociaux et environnementaux actuels (réduction de l'usage des produits phytosanitaires, préservation de la biodiversité, transmission des exploitations agricoles).

Nous disposons maintenant d'un protocole de co-conception de stratégies d'adaptation au changement climatique dans un territoire agricole qui peut être valorisé sur d'autres territoires où les acteurs sont désireux de réfléchir collectivement à des scénarios d'adaptation.

 **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- > Naulleau A, Gary C, Prévot L, Hossard L, 2021. Evaluating strategies for adaptation to climate change in grapevine production – a systematic review. *Front. Plant Sci.* 11: 607859. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607859>
- > Naulleau A, Prévot L, Gary C, Hossard L, 2021. Évaluer numériquement les impacts du changement climatique au sein d'un bassin viticole pour co-construire des stratégies d'adaptation. *AE&S*, accepté pour publication
- > Naulleau A, Gary C, Prévot L, Berteloot V., Gaudin R., Hossard L, 2022. Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. *Environ. Model. Softw.*, en révision.

Photo page 14 : paysage viticole du bassin versant d'étude © J. Dollinger



Contacts : Audrey Naulleau, Christian Gary, Laurent Prévot, Laure Hossard

Unités : ABSys, Lisah, Innovation

Départements : AgroEcoSystem, ACT

Centre INRAE : Occitanie Montpellier

Métaprogramme : CLIMAE

Mots-clés : Changement climatique, viticulture, adaptations locales, approche participative, simulation

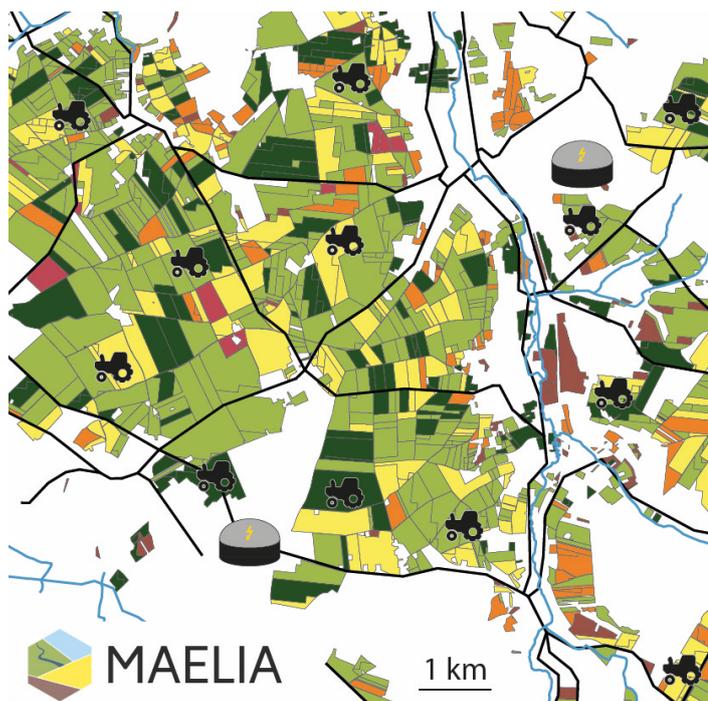


MAELAB : une entreprise pour la modélisation et l'évaluation intégrée des systèmes de bioéconomie territoriale

Les transitions agroécologiques et bioéconomiques interpellent les acteurs des filières et des territoires agricoles. Conduire une évaluation intégrée des performances et de la résilience de ces transformations nécessite de considérer les conditions et les enjeux de chaque territoire ainsi que prendre en compte les changements climatiques en cours et à venir. Pour répondre efficacement à leurs demandes, l'UMR LAE a initié la création de la start-up MAELAB (<https://www.maelab.fr>). Depuis juillet 2021, cette entreprise a pour objectif de répondre aux besoins d'évaluation de projets territoriaux via l'utilisation de la plateforme MAELIA, développée depuis plus de 10 ans par l'INRA, puis INRAE. MAELIA est une plateforme de modélisation et d'évaluation intégrées des systèmes de bioéconomie territoriale. Elle permet d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux de scénarios relatifs aux filières de production, transformation et recyclage des biomasses, aux modes de gestion des ressources naturelles (ex. eau) et aux changements climatiques.

CONTEXTE ET ENJEUX

La transition agroécologique est aujourd'hui au cœur de l'agenda de la recherche agronomique pour répondre aux enjeux de durabilité des systèmes agricoles. Parallèlement, les activités de valorisation non-alimentaire des biomasses se développent rapidement, notamment à travers la Stratégie Bioéconomie pour le développement de sociétés « biosourcées ». Cette dynamique, qui offre de nouvelles opportunités de diversification des cultures et de fertilisants organiques, peut servir de support au déploiement de systèmes agroécologiques.



Cependant, elle peut aussi générer de nouvelles pressions sur les ressources naturelles via l'intensification de l'utilisation des sols. Aussi, il est aujourd'hui essentiel d'évaluer de manière intégrée (multi-enjeux, multi-niveaux, multi-filières) les performances et la résilience de ces transformations considérant les conditions spécifiques et les enjeux de chaque territoire ainsi que les changements climatiques en cours et à venir.

Pour répondre à cet enjeu, INRAE développe depuis 10 ans la plateforme MAELIA (maelia-platform.inra.fr) de modélisation et d'évaluation intégrées des systèmes de bioéconomie territoriale. Elle permet d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux de scénarios relatifs aux filières de production, transformation et recyclage des biomasses, aux modes de gestion des ressources naturelles (ex. eau) et aux changements climatiques. Elle offre la possibilité d'évaluer une large gamme d'indicateurs relatifs aux cycles de l'eau, de l'azote et du carbone, aux propriétés des sols, aux services écosystémiques, aux émissions de GES, aux marges économiques et au travail... et leur résilience face à la variabilité des prix et du climat (passé ou futur).

RÉSULTATS

Pour faire face à la demande croissante d'utilisation de la plateforme émanant d'une diversité d'acteurs publics et privés, l'UMR LAE a initié la création de la start-up MAELAB (<https://www.maelab.fr>). Depuis l'été 2021, elle est en charge du déploiement de MAELIA dans la sphère économique. MAELAB sera impliquée, dès 2022, dans différentes études visant à évaluer (i) les capacités d'atténuation et d'adaptation des systèmes agricoles du Grand-Est vis-à-vis du changement climatique via les leviers de l'agroécologie et la bioéconomie (ex. méthanisation), (ii) les effets du déploiement de couverts intermédiaires et rotations diversifiées sur les flux d'eau verte et bleue dans les bassins déficitaires et (iii) des stratégies d'adaptation de la gestion de l'eau dans des bassins contrastés. Cette start-up est fortement impliquée dans les interactions avec la Chambre Régionale d'Agriculture et l'APCA visant à définir les modalités de transfert de MAELIA dans ces institutions.

PERSPECTIVES

En collaboration avec Agrosolutions et l'UMR LAE, MAELAB monte un projet GRAINE visant à évaluer des stratégies combinant agroécologie et bioéconomie pour développer l'autonomie azotée des systèmes agricoles dans les territoires contrastés de 5 coopératives partenaires, réparties en France métropolitaine. Par ailleurs, MAELAB sera impliquée dans des projets d'extension des fonctionnalités de MAELIA qui permettront de traiter de questions relatives à la gestion territoriale des forêts, des régulations biologiques et de la biodiversité.

VALORISATION

Le projet MAELAB est lauréat du concours i-PhD de la BPI France et accompagné par l'incubateur de start-up innovantes SEMIA.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > <http://maelia-platform.inra.fr/accueil/references/>
- > Allain S, Ndong GO, Lardy R, Leenhardt D 2018. Integrated assessment of four strategies for solving water imbalance in an agricultural landscape. *Agron Sustain Dev* 38:60. doi:10.1007/s13593-018-0529-z
- > Catarino R, Therond O, Berthomier J, Miara M., Mérot E., Misslin R., Vanhove P., Villerd J., Angevin F., 2021. Fostering local crop-livestock integration via legume exchanges using an innovative integrated assessment and modelling approach based on the MAELIA platform. *Agricultural Systems*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103066>
- > Mazzega, P., Therond, O., Debril, T., March, H., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Sant'Ana, D., 2014. Critical Multi-Scale Governance Issues of the Integrated Modeling: Example of the Low-Water Management in the Adour-Garonne Basin (France). *Journal of hydrology*. DOI 10.1016/j.jhydrol.2014.09.043
- > Murgue, C., Therond, O., Leenhardt, D., in revision. Towards sustainable water and agricultural land management: participatory design of spatial distributions of cropping systems in a water-deficit basin. *Land use policy*.



Contact : Olivier Therond

Unité : UMR LAE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Grand-Est-Colmar

Metaprogrammes : BETTER, CLIMAE et BIOSEFAIR

Mots clés : Bioéconomie, agroécologie, systèmes de culture, impacts, services écosystémiques, performances socio-économiques, changements climatiques



L'azote : un élément clé pour le développement de l'agriculture biologique

Assurer la transition des systèmes agricoles pour garantir un niveau de production suffisant, de qualité, et durable est un enjeu majeur pour nos sociétés. Le développement de l'agroécologie repose sur plusieurs leviers dont l'agriculture biologique fait partie. Or, l'une des limites du développement du bio est la ressource restreinte en azote dans le sol, indispensable à la croissance des plantes. Cette variable n'a jusqu'à présent jamais été prise en compte dans les travaux explorant la possibilité de satisfaire la demande alimentaire mondiale par l'expansion de l'agriculture biologique. Une équipe de recherche d'INRAE et de Bordeaux Sciences Agro a développé un modèle simulant, à l'échelle mondiale, l'offre et la demande en azote des cultures pour de tels scénarios, excluant l'usage d'engrais azotés de synthèse. Leurs résultats, publiés le 13 mai dans *Nature Food*, montrent que le déploiement mondial de l'agriculture biologique peut être limité par la disponibilité en azote. Ils montrent également que, pour être soutenable, il doit s'accompagner d'une transformation des systèmes d'élevage, d'un rééquilibrage de l'alimentation humaine et d'une baisse importante du gaspillage alimentaire.

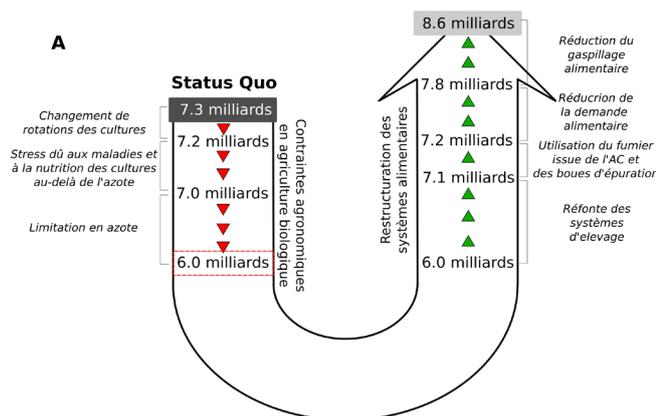
L'azote est un élément indispensable à la croissance et au développement des plantes cultivées qu'elles trouvent dans le sol et dont dépend la productivité agricole. En agriculture conventionnelle, cet élément est apporté par des fertilisants de synthèse qui sont interdits en agriculture biologique. La fourniture d'azote aux cultures en agriculture biologique repose essentiellement sur les fumiers issus de l'élevage et, dans une moindre mesure, sur la fixation de l'azote atmosphérique dans le sol, effectuée par les légumineuses. Cependant, ces deux sources ne sont pas infinies ni inépuisables. Représentant aujourd'hui environ 8% de la production agricole française, et moins de 2% à l'échelle mondiale, le développement de l'agriculture biologique à grande échelle pose des questions majeures à la recherche : son développement pourrait-il être limité par la disponibilité en ressources azotées compatibles avec le cahier des charges de l'agriculture biologique ? Et cette disponibilité limitée est-elle susceptible d'avoir des impacts sur le rendement des cultures et la sécurité alimentaire mondiale ?

Pour répondre à cette question, les scientifiques d'INRAE et de Bordeaux Sciences Agro ont mis au point un modèle qui simule l'offre et la demande en azote des productions agricoles en fonction de différents scénarios de développement de l'agriculture biologique à l'échelle mondiale : scénarios de 20, 30, 40%... jusqu'à 100% des cultures mondiales en agriculture biologique. Sur la base des pratiques d'élevage et de la consommation alimentaire actuels, leurs résultats montrent que le développement de l'agriculture biologique s'accompagne dans de nombreuses régions du monde d'un déficit marqué en azote et donc d'une baisse importante du rendement des cultures.

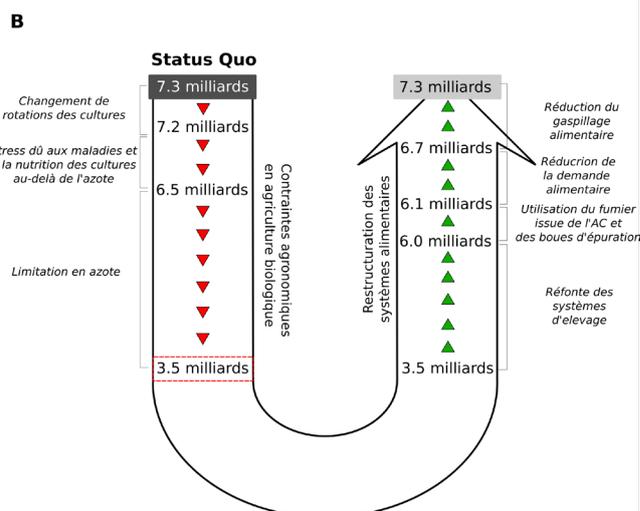
L'élevage est indispensable au développement de l'agriculture biologique du fait de sa capacité à fournir de l'azote pour enrichir les sols grâce au fumier. Mais il faut un équilibre, car les animaux consomment également ce qui est issu des cultures et peuvent ainsi être en compétition avec l'alimentation humaine. Dès lors, il semble nécessaire de combiner plusieurs leviers dont la réduction du nombre global des animaux d'élevage, en particulier dans les élevages porcins et aviaires qui sont en compétition directe avec l'alimentation humaine car principalement nourris avec des céréales, et la relocalisation des élevages de ruminants au plus près des cultures, notamment dans les prairies, pour reconnecter productions végétales et animales et optimiser le recyclage de l'azote.

Un des autres leviers serait de rééquilibrer la consommation alimentaire mondiale. En moyenne, elle est estimée à 2890 kcal par personne et par jour, alors que 2200 kcal seraient suffisant. Ce rééquilibrage passerait par une baisse de la consommation alimentaire moyenne dans les pays développés (consommation d'environ 3000 kcal en Europe et Amérique du Nord) accompagnée d'une augmentation dans les pays en voie de développement, notamment en Afrique. Enfin la réduction du gaspillage alimentaire d'au moins 50% serait incontournable.

L'AB occupe 20% de la surface agricole mondiale



L'AB occupe 60% de la surface agricole mondiale



Développement de l'agriculture biologique (AB) : effet sur la production agricole (en rouge) et leviers activables pour soutenir la production et satisfaire la demande alimentaire (en vert). La figure indique le nombre de personnes pouvant être alimentées par la production agricole (biologique + conventionnelle) à l'échelle mondiale. Elle présente deux situations correspondant à 20% (panneau A) ou 60% (panneau B) de la surface agricole mondiale occupé par l'AB (le reste de la surface agricole étant occupé par l'agriculture conventionnelle, notée AC dans la figure). © Nature Food

En agissant sur ces points, il serait possible d'augmenter la part de l'agriculture biologique mondiale jusqu'à 60% au moins tout en répondant à la demande alimentaire mondiale. Les scientifiques explorent actuellement d'autres pistes pour développer l'agriculture biologique comme l'augmentation de la part des cultures de légumineuses, qui fixent l'azote d'origine atmosphérique dans le sol, et qui pourraient être valorisées dans l'alimentation humaine et des élevages.

VALORISATION

> Ce fait marquant est issu d'un communiqué de presse INRAE et Bordeaux Sciences Agro du 17 mai 2021 : <https://www.inrae.fr/actualites/lazote-element-cle-developpement-lagriculture-biologique>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Pietro Barbieri, Sylvain Pellerin, Verena Seufert, Laurence Smith, Navin Ramankutty, Thomas Nesme. Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. Nature Food 2021 DOI : 10.1038/s43016-021-00276-y



Contacts : Pietro Barberi, Thomas Nesme

Unité : UMR Interaction Sol Plantes Atmosphère (ISPA)

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Nouvelle-Aquitaine Bordeaux

Mots clés : Agriculture biologique, disponibilité de l'azote, adaptation des systèmes de culture, transformation de l'agriculture



L'objectif 4 pour 1000 est-il atteignable dans les sols français ?

Une approche fondée sur le bilan carbone et l'évaluation de la saturation en carbone des sols

Il a été suggéré qu'une augmentation annuelle de 0,4% (4 pour 1000) des stocks de carbone organique du sol pourrait compenser les émissions anthropiques actuelles de CO₂, et ainsi contribuer à l'atténuation du changement climatique. L'évolution du stock de carbone organique dans les sols dépend de la capacité de la biosphère à alimenter le sol en carbone organique, de l'activité des microorganismes qui décomposent la matière organique du sol, mais aussi de phénomènes de saturation. Dans ce travail nous avons réuni pour la première fois ces trois composantes essentielles, en mobilisant des modèles et des données spatiales, afin d'aboutir à une estimation du potentiel de stockage pour la France métropolitaine. Les simulations montrent qu'une augmentation de 30 à 40% des apports de carbone organique dans le sol serait nécessaire afin de voir les stocks augmenter de 4 pour 1000 par an sur une période de 30 ans. En termes de gestion, les priorités pour la France métropolitaine devraient être (i) d'augmenter les entrées de carbone dans les sols insaturés des grandes cultures et (ii) de préserver les stocks, souvent élevés, des prairies permanentes et des forêts.



CONTEXTE ET ENJEUX

Les perspectives d'émissions négatives de gaz à effet de serre constituent un élément indispensable des politiques d'atténuation du changement climatique. Les sols sont associés à l'une de ces perspectives les plus prometteuses, par le biais du stockage du carbone organique qui peut, pour un temps, s'y trouver piégé. Sur la base d'un simple rapport entre les émissions anthropiques de CO₂ et les stocks de carbone organique du sol dans le monde, il a été suggéré qu'une augmentation annuelle de 0,4% (4 pour 1000) des stocks de carbone organique du sol pourrait compenser les émissions anthropiques actuelles de CO₂ (Soussana et al., 2019). Il existe toutefois une large incertitude quant au potentiel de stockage de carbone organique dans les sols, et notamment dans le contexte français.



RÉSULTATS

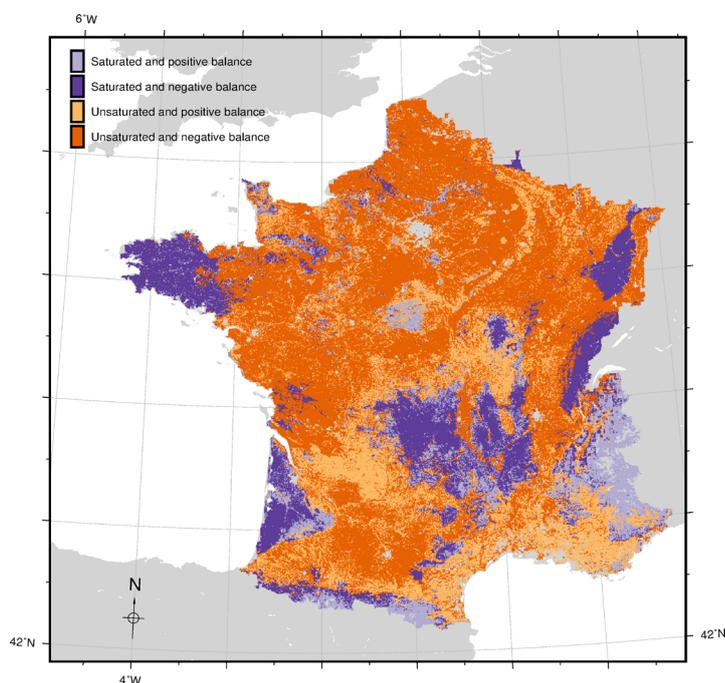
Les calculs ont montré qu'une augmentation de 30 à 40% des apports de carbone organique dans le sol serait nécessaire pour voir les stocks de carbone organique du sol augmenter de 4 pour 1000 par an sur une période de 30 ans. Nos estimations montrent que 88% des cultures en terre arable sont actuellement sur des sols dont la fraction fine (argile et limons fins) est insaturée en carbone organique. Elles sont cependant caractérisées par des entrées de carbone, principalement issues des résidus de culture et de la fertilisation organique dans les pratiques dominantes actuelles, insuffisantes pour atteindre l'objectif ambitieux de 4 pour 1000. A l'inverse, 90% des prairies permanentes en gestion extensive sont caractérisées par un bilan carbone positif, c'est-à-dire présentant des entrées de carbone suffisamment importantes au regard de la minéralisation de la matière organique dans le sol. Près de 60% d'entre elles sont toutefois sur des sols déjà saturés en carbone organique et n'offrent donc pas de capacité de stockage additionnel. Les prairies permanentes en gestion intensives et les forêts présentent un bilan global plus contrasté.



PERSPECTIVES

Les données à venir des réseaux de surveillance des sols tels que le RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) devraient permettre

d'évaluer ces résultats obtenus par simulation, avec des variations des stocks attendues à la hausse pour les sols non saturés et où les entrées de carbone organique sont suffisamment élevées, et inversement à la baisse dans les sols saturés et présentant des entrées insuffisantes. Du point de vue de la gestion des sols, nos résultats suggèrent que, pour la France métropolitaine, les priorités devraient être (i) d'augmenter les entrées de carbone dans les sols insaturés des grandes cultures et (ii) de préserver les stocks de carbone organique du sol, souvent élevés, des prairies permanentes et des forêts.



Carte illustrant la typologie des sols français selon leur potentiel de stockage de carbone organique, dans la perspective de l'objectif 4 pour mille. Le potentiel est caractérisé d'une part par la différence entre les entrées de carbone organique dans les sols et la minéralisation (nommé le bilan carbone), et d'autre part par le niveau de saturation des sols en carbone organique. © CC BY-NC 4.0

VALORISATION

Des travaux se poursuivent pour préciser les potentiels de stockage, notamment dans le cadre du projet européen EJP-SOIL CarboSeq. Les outils que nous avons développés ont également été utilisés dans le cadre d'un exercice international piloté par la FAO.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Martin M., Dimassi B., Roman Dobarco M., Guenet B., Arrouays D., Angers D.A., Soussana J.F., Pellerin S. 2021. Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon. A case study for France. *Global Change Biology*, 27 (11) , 2458-2477.



Contacts : Manuel Martin (US INFOSOL), Sylvain Pellerin (UMR ISPA)

Unité : Infosol

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Val de Loire

Métaprogramme : ACCAF

Mots clés : 4 pour 1000, atténuation du changement climatique, productivité primaire nette, modélisation, carbone organique du sol, saturation



Evaluer le carbone stocké par les haies dans le compartiment sol

L'introduction d'arbres dans les espaces agricoles est identifiée comme un levier d'atténuation du changement climatique et d'accroissement du stock de carbone dans les sols. Bien que les haies soient largement répandues de par le monde, il y a encore peu de données sur leur contribution au stockage de carbone, notamment en milieu tempéré. Des travaux récents menés dans l'ouest de la France (Bretagne, Pays de Loire) ont permis d'évaluer ces stocks à proximité de haies récentes, plantées il y a 20 ans, ou plus anciennes et plantées il y a entre 40 et 120 ans. Ils montrent un effet significatif de la haie sur les stocks de carbone dans le sol des parcelles adjacentes, jusqu'à 3 mètres de distance. L'augmentation annuelle de stocks est estimée entre 9 et 13‰ localement autour de la haie, soit 2 à 3 fois l'objectif annuel de croissance de 4‰ des stocks de carbone du sol qui permettrait de compenser les émissions de CO₂ liées aux activités humaines. Par contre, à l'échelle d'un paysage, l'impact des haies sur le stockage de carbone est inférieur à l'objectif 4‰ : dans un paysage théorique composé de parcelles carrées de 1 ha, l'implantation de haies tout autour des parcelles ne permettrait qu'un stockage de carbone additionnel annuel de 1 à 1,5‰ ce qui suggère que cette implantation soit pensée en complément d'autres pratiques.



CONTEXTE ET ENJEUX

Le rôle majeur de la reforestation et de l'introduction d'arbres est de plus en plus mis en avant dans la lutte contre le changement climatique (Bastin et al., 2019). En particulier, les systèmes agroforestiers, dont les haies, sont promus comme un moyen de planter des arbres dans les espaces agricoles, tout en conservant une proportion significative de l'espace dédiée aux cultures non ligneuses. Des outils d'aide à la planification de la plantation et à la gestion durable des haies (Plan de Gestion Durable des Haies) sont en cours de développement au niveau national, et le stockage de carbone est l'une des entrées prises en compte dans ces plans. Si plusieurs synthèses scientifiques pointent le potentiel de stockage de carbone dans le compartiment sol des systèmes agroforestiers (Shi et al., 2018) et bocagers (Arrouays et al. 2002), elles montrent aussi que les références disponibles sont très peu nombreuses, en particulier en contexte tempéré, et qu'elles concernent des haies héritées d'un bocage ancien. Ce travail



*Haie implantée en 1998, composée de chênes, charmes et noisetiers, située à Maël-Carhaix (Côtes-d'Armor, 48,28°N, -3 ; 43°O)
© Valérie Viaud, INRAE*

avait pour objectif de quantifier le stockage de carbone dans les sols associé à la présence de haies bocagères anciennes ou plantées plus récemment (15 à 20 ans), en Bretagne et Pays de La Loire.

RÉSULTATS

Les résultats confirment un stockage de carbone additionnel significatif localement au voisinage des haies. La haie a un effet sur l'augmentation des teneurs en carbone du sol jusqu'à 1 m de distance pour la profondeur 0 - 60 cm, et elle a un effet jusqu'à 3 m pour la profondeur 60 - 90 cm. Les haies permettent un taux de stockage additionnel de carbone dans le sol de 9 à 13‰ par an, sur cette zone d'influence, par rapport à la parcelle adjacente dans les contextes étudiés. A l'échelle des paysages agricoles, elles peuvent contribuer à l'augmentation du stockage de carbone dans les sols, mais leur impact reste faible compte-tenu des surfaces qu'elles occupent (0,4 à 1‰ par an pour 100 m linéaire de haies par hectare). Les résultats mettent aussi en évidence la forte variabilité du potentiel de stockage de carbone au voisinage des haies, entre les sites étudiés et intra-site.

PERSPECTIVES

Ce travail se poursuit aujourd'hui avec l'objectif de consolider ces références en élargissant les mesures à d'autres types de sol, systèmes de cultures, et modes de gestion des haies. Cela permettra de comprendre quelles sont les conditions les plus favorables au stockage de carbone par les haies et de valoriser au mieux ce levier d'atténuation.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- > Viaud, V., Kunnemann, T. 2021. Additional soil organic carbon stocks in hedgerows in crop-livestock areas of western France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 305, 107174. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107174>
- > Valorisation opérationnelle : ces résultats ont été intégrés dans la Méthode Haies1 approuvée par le Ministère de la Transition Ecologique dans le cadre du Label bas-carbone. Cette méthode est portée par la Chambre d'agriculture de Pays de La Loire en partenariat avec la Chambre d'agriculture de Bretagne et fait suite au projet Carbochage. Elle comptabilise la séquestration du carbone dans les sols et dans la biomasse des haies des exploitations agricoles en France.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- > <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/M%C3%A9thode%20haies%20LBC%20VF.pdf>



Contact : Valérie Viaud

Unité : UMR SAS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bretagne-Normandie

Mots clés : Haie, stockage carbone, évaluation, sol



ResidueGas : Estimation de la contribution des résidus végétaux aux émissions de N₂O des sols et importance de la maturité physiologique des biomasses recyclées

Le projet FACCE ERA-GAS ResidueGas associant INRAE aux partenaires de 5 pays européens (Danemark coord., Suède, Norvège, Grande-Bretagne, Allemagne) a porté sur la quantification et la modélisation des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) du sol en présence de résidus de culture en décomposition. Ces résidus sont constitués par les matières végétales laissées à la surface ou dans le sol après la récolte, ainsi que par la destruction des couverts intermédiaires et prairiaux. L'impact de leur restitution sur les émissions de N₂O a été étudié par une méta-analyse de la littérature, des expériences réalisées au laboratoire et au champ et de la modélisation. Le projet a démontré l'importance de la nature chimique des résidus restitués aux sols et notamment leur contenu en carbone facilement biodégradable, sur la dynamique et l'intensité des flux de N₂O. Les expérimentations et la modélisation démontrent que ces émissions de N₂O peuvent, dans certaines situations à risque, réduire voire annuler les bénéfices liés à l'augmentation du stockage de carbone dans les sols. Les résultats du projet ont soulevé un point délicat autour des résidus encore « verts » issus de plantes physiologiquement immatures (résidus de couverts détruits tels que cultures intermédiaires, prairies) car ils sont liés à des situations fortement émettrices, et le besoin d'évaluer cet impact au regard des autres services écosystémiques que ces résidus contribuent à rendre. Des pistes pour améliorer les inventaires de N₂O issus des résidus de cultures, notamment en distinguant les résidus des parties aériennes des racines et en tenant compte de la maturité physiologique des plantes au moment de leur restitution ont été suggérées.



CONTEXTE ET ENJEUX

Les résidus de culture fournissent des apports de carbone et d'azote aux sols et contribuent de différentes manières au bilan net de gaz à effet de serre (GES) des rotations de cultures. Ils constituent un élément clé des inventaires nationaux des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) provenant de l'agriculture. Les émissions de N₂O associées au recyclage des résidus de culture varient considérablement en fonction de la nature des résidus, de leur gestion et des sols. Ce phénomène n'est actuellement pas reflété dans les inventaires d'émissions selon la méthode IPCC et probablement pas suffisamment dans les prédictions des modèles.



RÉSULTATS

Le projet a développé une base de données de la littérature sur la composition chimique (teneur en azote et composition biochimique) des résidus végétaux, librement accessible sur l'entrepôt de données Data INRAE. Une méta-analyse des effets des apports des résidus sur les émissions de N₂O au champ a conclu à l'augmentation, en moyenne, des émissions de N₂O en présence de résidus végétaux. Cette analyse a aussi démontré que les résidus combinant une forte teneur en azote total et en composés solubles (résidus de cultures intermédiaires, couverts prairiaux après destruction, résidus de cultures légumières) favorisent des émissions élevées. Des expériences menées en

conditions contrôlées ont permis de confirmer ces résultats, en montrant que la teneur initiale en composés solubles des résidus est le meilleur critère pour prédire l'émission de N_2O , toutes choses égales par ailleurs. Sur la base de facteurs d'émission de N_2O nouvellement établis au cours du projet, et de modèles mécanistes existants (CERES-EGC, Landscape DNDC), une approche de modélisation sur l'Europe a évalué des options de gestion des résidus selon différents scénarios climatiques. Les effets à long terme de la gestion des résidus sur les bilans de GES sont clairement déterminés par les émissions de N_2O , qui annulent les avantages liés à l'augmentation des stocks de carbone organique du sol sur des périodes supérieures à 10 ou 15 ans.



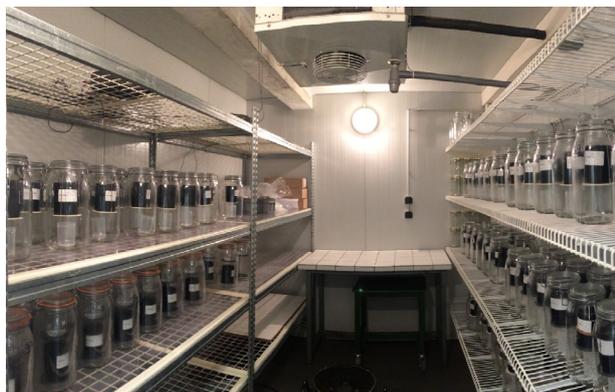
Paillis de maïs après récolte © P. Thiébeau - INRAE UMR FARE

PERSPECTIVES

Les résultats du projet vont permettre de mieux définir les situations à risque d'émission liée à la gestion des résidus de culture (« hot moments ») dans les agroécosystèmes explorés par le consortium ResidueGas. Ils permettent aussi de proposer des évolutions du facteur d'émission (E_f) dans les inventaires pour les résidus, en différenciant notamment les situations faiblement émettrices (racines, résidus de cultures détruites à maturité ou sénescentes) et les situations fortement émettrices (résidus de cultures immatures à forte teneur en azote et carbone labile).

VALORISATION

ResidueGas a produit plusieurs articles scientifiques, et a été le support d'un doctorat cofinancé par INRAE. Le projet a organisé deux webinaires européens, l'un avec des porteurs d'enjeux du monde agricole pour échanger sur les options d'atténuation des émissions de GES par les agroécosystèmes, l'autre avec les organismes en charge des inventaires nationaux d'émission sur les facteurs d'émission. Les valorisations du projet peuvent être suivies sur le site web <https://projects.au.dk/residuegas/>. Les données expérimentales sont déposées sur l'entrepôt Data INRAE, pour la contribution française.



Chambre d'incubation des sols avec résidus en conditions contrôlées, et dispositif automatisé de mesures du CO_2 et N_2O émis © G. Lashermes - INRAE FARE & P. Laville - INRAE ECOSYS

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Lashermes G., Recous S., Alavoine G., Janz B., Butterbach-Bahl K., Ernfors M., Laville P. (2021) N_2O emissions from decomposing crop residues are strongly linked to their initial soluble fraction and early C mineralization. *Science of The Total Environment*, 150883. Data INRAE
- > Janz B., Havermann F., Lashermes G., Zuazo P., Engelsberger F., Torabi S.M., Butterbach-Bahl K. (2021) Effects of crop residue incorporation

and properties on combined soil gaseous N₂O, NO, and NH₃ emissions—A laboratory-based measurement approach, Science of The Total Environment, 151051.

- > Abalos D., Rittl T.F., Recous S., Thiébeau P., et al. Predicting field N₂O emissions from crop residues based on their biochemical composition: a meta-analytical approach. Science of The Total Environment (under revision)
- > Carozzi M., Haas E., Butterbach-Bahl K., Scheer C., Massad R.S. Crop residue management affects European N₂O emission inventories and N balance : a multimodel assessment. Science of The Total Environment (under revision)
- > Haas E., Carozzi M., Massad R.S., Butterbach-Bahl K., Scheer C. Long term impact of residue management on soil organic carbon stocks and nitrous oxide emissions from European croplands. Science of The Total Environment (under revision)
- > Thiébeau P., Jensen L.S., Ferchaud F., Recous, S. (2021) Dataset of biomass and chemical quality of crop residues from European areas, Data in Brief 37, 107227. Data INRAE
- > Chandra, V. (2021) Emissions de protoxyde d'azote (N₂O) et d'ammoniac (NH₃) lors de la décomposition des résidus de culture dans les sols. Thèse de doctorat de l'Université de Paris Saclay, 30 septembre 2021.



Contacts : G. Lashermes, S. Recous, R.S. Massad, B. Loubet

Unités : UMR FARE Reims, UMR ECOSYS Versailles-Grignon

Département : AgroEcoSystem

Centres INRAE : Grand-Est Nancy / IdF Versailles-Grignon

Mots clés : Gaz à effet de serre, résidus de culture, N₂O, matières organiques, sol, pratiques culturales, inventaires d'émission GES



Evaluation du potentiel de transfert des pesticides vers l'atmosphère à partir de leurs propriétés moléculaires

Lors du traitement des cultures, une partie des quantités de pesticides appliquées peut atteindre l'atmosphère par dérive en sortie du pulvérisateur, volatilisation à partir du sol et/ou des plantes et érosion éolienne. La volatilisation représente jusqu'à quelques dizaines de % de la dose initiale pour certains composés. Le suivi de la contamination de l'air par les pesticides fait l'objet de campagnes plus ou moins ponctuelles et locales par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) et les connaissances sont encore insuffisantes pour identifier la voie de transfert majoritaire vers l'atmosphère. Dans ce contexte, ce travail avait pour objectif d'améliorer la compréhension et l'évaluation du potentiel d'émission des pesticides par volatilisation. L'outil TyPol a été utilisé pour explorer la relation entre le potentiel de volatilisation de 178 pesticides et leurs propriétés moléculaires. TyPol repose sur le principe que la structure des molécules est responsable de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques, permettant de comprendre et prédire leur activité ou leur comportement dans l'environnement. Les sorties de TyPol ont été comparées à des concentrations en pesticides mesurées dans l'air de cinq sites agricoles en France. TyPol a permis de discriminer les pesticides qui étaient observés dans l'air de ceux qui ne l'étaient pas. Il peut être utilisé pour réaliser une première estimation du risque de contamination de l'air par les pesticides et ainsi contribuer à protéger l'environnement et la santé humaine.



CONTEXTE ET ENJEUX

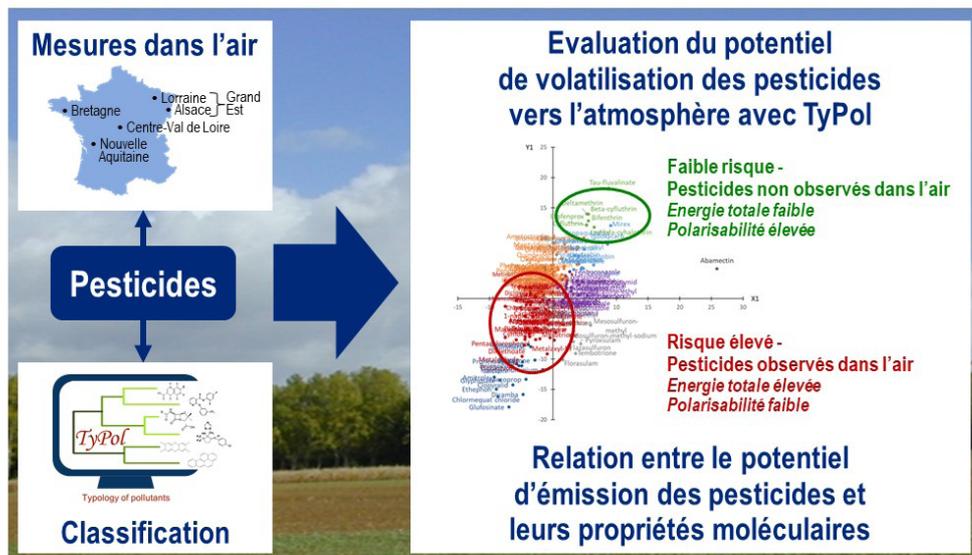
Lors du traitement des cultures, une partie des quantités de pesticides appliquées peut atteindre l'atmosphère par dérive en sortie du pulvérisateur, volatilisation à partir du sol et/ou des plantes et érosion éolienne. La volatilisation représente jusqu'à quelques dizaines de % de la dose initiale pour certains composés. Le suivi de la contamination de l'air par les pesticides fait l'objet de campagnes plus ou moins ponctuelles et locales par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) (Bedos et al., 2019) et les connaissances sont encore insuffisantes pour identifier la voie de transfert majoritaire vers l'atmosphère, qui dépend des composés. Dans ce contexte, ce travail avait pour objectif d'améliorer la compréhension et l'évaluation du potentiel d'émission des pesticides par volatilisation.



RÉSULTATS

L'outil TyPol (Servien et al., 2014) a été utilisé pour explorer la relation entre le potentiel de volatilisation de 178 pesticides et leurs propriétés moléculaires. Les 178 composés ont été choisis à partir (1) de travaux antérieurs des AASQA, (2) de la liste des pesticides prioritaires à suivre dans l'atmosphère (Hulin et al., 2021), (3) des données de ventes et des acteurs locaux de différents sites explorés dans le cadre du projet REPP'AIR (CAGE, 2016). TyPol repose sur le principe que la structure des molécules joue un rôle important dans le déterminisme de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques, permettant de comprendre et prédire leur activité ou leur comportement dans l'environnement. Cet outil génère une typologie des molécules ayant des comportements similaires, du fait de leurs structures moléculaires proches. Les sorties de TyPol ont été comparées à des concentrations en pesticides mesurées dans l'air de cinq sites agricoles localisés en Bretagne, Centre-Val de Loire, Grand Est et Nouvelle Aquitaine (CAGE, 2016). En confrontant la typologie ainsi obtenue (pesticides susceptibles ou non d'être volatilisés) aux mesures, nous avons démontré que TyPol permet de différencier les

pesticides qui sont observés dans l'air de ceux qui ne le sont pas, bien que TyPol ne considère pas les quantités utilisées ni les pratiques phytopharmaceutiques. Le classement des composés tenant compte, en plus de la pression de vapeur, des paramètres conditionnant le potentiel d'émission à partir du sol (caractéristiques de rétention et de persistance, solubilité dans l'eau) ou de la plante (propriétés lipophiles) permet de bien discriminer les pesticides. Les pesticides ayant un potentiel de volatilisation élevé ont une énergie totale élevée et une faible polarisabilité.



Evaluation du potentiel de transfert des pesticides vers l'atmosphère à partir de leurs propriétés moléculaires grâce à l'outil TyPol © L. Mamy

PERSPECTIVES

L'outil TyPol a permis d'améliorer la compréhension du potentiel de volatilisation des pesticides. Il peut être utilisé pour réaliser une première estimation du risque de contamination de l'air par les pesticides et ainsi contribuer à protéger l'environnement et la santé humaine.

VALORISATION

> Mamy L, Bonnot K, Benoit P, Bockstaller C, Latrille E, Rossard V, Servien R, Patureau D, Prevost L, Pierlot F, Bedos C, 2021. Assessment of pesticides volatilization potential based on their molecular properties using the TyPol tool. *Journal of Hazardous Materials* 415, 125613. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125613>

> Mamy L, 2021. Article « Mamy et al., 2021. *Journal of Hazardous Materials*. 415, 125613 » scoopé par Life Sciences Université Paris-Saclay (<http://sco.lt/89IM1Y>)

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Hulin M, Leroux C, Mathieu A, Gouzy A, Berthet A, Boivin A, Bonicelli B, Chubilleau C, Hulin A, Leoz Garziandia E, Mamy L, Millet M, Pernot P, Quivet E, Scelo AL, Merlo M, Ruelle B, Bedos C, 2021. Monitoring of pesticides in ambient air: Prioritization of substances. *Science of the Total Environment* 753, 141722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141722>

Contacts : Laure Mamy, Carole Bedos, Pierre Benoit, Christian Bockstaller, Eric Latrille, Dominique Patureau, Virginie Rossard, Rémi Servien

Unités : ECOSYS, LAE, LBE

Département : AgroEcoSystem

Centres INRAE : IdF Versailles-Grignon, Grand Est-Colmar, Occitanie-Montpellier

Mots clés : Contamination de l'air, sol, plante, mesures, risque, descripteurs moléculaires



Répartition des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols métropolitains et risques sanitaires associés

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des polluants organiques persistants produits par les activités anthropiques qui contaminent tous les compartiments de l'environnement, y compris les sols. Cette étude a porté sur les HAP mesurés sur des échantillons de sols de surface des sites du RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) répartis en France métropolitaine. Les concentrations quantifiées pour la somme des 15 HAP varient de 5,1 à 31 200 $\mu\text{g kg}^{-1}$, avec une valeur médiane de 32,6 $\mu\text{g kg}^{-1}$, et les HAP ont été détectés dans 70% des échantillons de sol. La carte des concentrations pour la somme des 15 HAP a révélé de fortes variations spatiales de la contamination des sols dans toute la France, avec des concentrations supérieures à 200 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ dans les sols des régions industrielles du Nord Est et près des grandes villes. La présence importante de HAP dans les sols du Nord de la France serait liée aux émissions historiques de la période industrielle de la fin du 19^{ème} siècle. Une évaluation des risques sanitaires simplifiée menée pour la population résidentielle a abouti à une valeur médiane de $1,07 \times 10^{-8}$ pour le risque total de cancer au cours de la vie, avec 20 sites (0,9% de la totalité des sites) au-dessus de la limite de 10^{-6} et un au-dessus de la limite de 10^{-5} adoptée par le gouvernement français. Ces résultats révèlent la nécessité de poursuivre des études à grande échelle sur la contamination des sols pour déterminer le devenir des HAP et évaluer les risques induits par la pollution des sols.



CONTEXTE ET ENJEUX

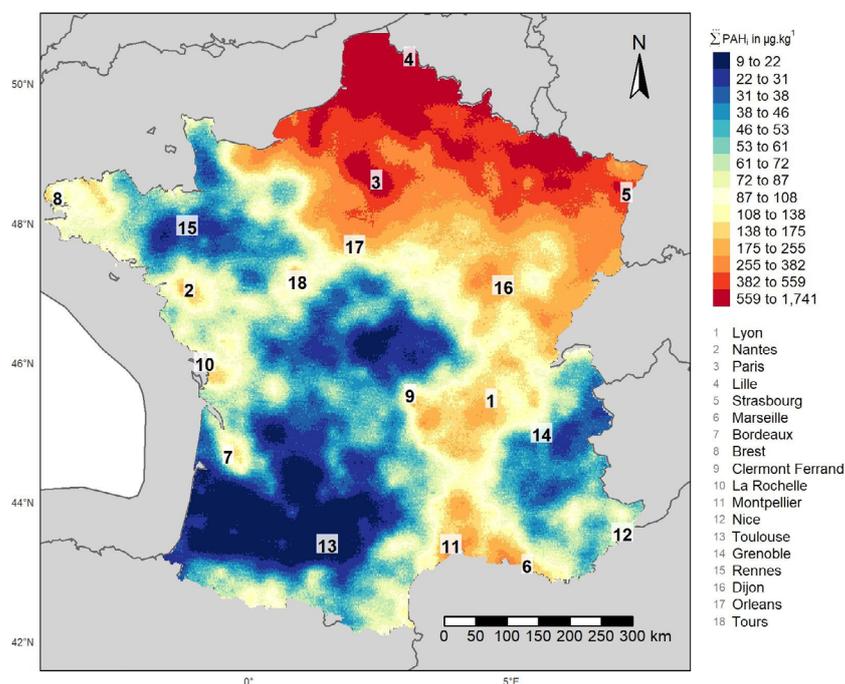
Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont la cible des agences mondiales de l'environnement et de la santé publique depuis 1970 en raison de leur caractère mutagène et cancérigène. De nombreuses études ont souligné que les sols peuvent être considérés à la fois comme un puits et une source de ces molécules dans l'environnement. L'analyse permettant la caractérisation des distributions statistiques et la cartographie à l'échelle nationale de la répartition des HAP s'est fondée sur les échantillons de sol issus du RMQS. Ce réseau national de surveillance de la qualité des sols repose sur une répartition des sites selon un maillage régulier couvrant l'ensemble du territoire français, métropole et outre-mer. Les analyses de HAP ont été effectuées sur les sols métropolitains avec le Laboratoire d'Analyse des Sols INRAE à Arras.



RÉSULTATS

Les concentrations quantifiées pour la somme des 15 HAP varient de 5,1 à 31 200 $\mu\text{g kg}^{-1}$, avec une valeur médiane de 32,6 $\mu\text{g kg}^{-1}$, et les HAP ont été détectés dans 70% des échantillons de sol. Le Fluoranthène est le composé le plus détecté. Selon le référentiel d'interprétation de la contamination en HAP (Maliszewska-Kordybach 1996), 83% du territoire français correspondrait à des sols non contaminés mais près de 3% des sites dépassent le seuil de forte contamination. Une approche par géostatistique non linéaire a permis de produire la carte des concentrations pour la somme des 15 HAP. Elle révèle de fortes variations spatiales de la contamination des sols de France. Les

concentrations les plus importantes sont observées dans les régions industrielles des Hauts-de-France, du Grand Est et dans la vallée du Rhône, ainsi que sous forme de gradients diffus, notamment autour des grandes agglomérations. L'étude des ratios de concentrations de certains HAP permet d'identifier les sources probables de contaminations. Ces ratios suggèrent ainsi pour le Nord de la France une origine liée aux émissions industrielles importantes de 1850-1950, en particulier par l'industrie du charbon et la métallurgie. Une évaluation simplifiée des risques sanitaires menée pour la population résidentielle a abouti à une valeur médiane de $1,07 \times 10^{-8}$ pour le risque total de cancer au cours de la vie, avec 20 sites (0,9% de la totalité des sites) au-dessus de la limite de 10^{-6} et un au-dessus de la limite de 10^{-5} adoptée par le gouvernement français.



Carte de distribution des concentrations pour la somme des 15 HAP (Σ15 PAH) dans les sols français en µg.kg⁻¹

PERSPECTIVES

D'autres contaminants appartenant au groupe des polluants organiques persistants tels que les dioxines ou les polychlorobiphényles ont également été analysés et la caractérisation spatiale de leur distribution statistique sur le territoire national est en cours.

VALORISATION

Les informations statistiques produites dans le cadre de ce travail et mises en ligne sur data.inrae.fr alimentent notamment les travaux des gestionnaires des sites et sols pollués pour la valorisation des terres excavées. Froger, C., Saby, N., Jolivet, C., Boulonne, L., Freulon, X., De Fouquet, C., Roussel, H., Marot, F., & Bispo, A. (2021). Données de réplification pour : Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils [Data set]. Portail Data INRAE. <https://doi.org/10.15454/WPR2C9>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Maliszewska-Kordybach, B.: Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination, *Appl. Geochemistry*, 11(1-2), 121-127, doi:10.1016/0883-2927(95)00076-3, 1996.



Contacts : Nicolas Saby, Claire Froger, Antonio Bispo

Unité : InfoSol

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Val de Loire

Mots clés : Sol, contamination, HAP, exposition, cartographie



Evaluation des composés perfluorés émergents dans divers produits résiduaux organiques : intérêt d'un réseau de sites d'observation de longue durée

Les composés perfluorés (PFAS) sont retrouvés de façon croissante dans les environnements terrestres et aquatiques, sans que leurs apports aux sols agricoles soient totalement compris. Dans cette étude, nous avons caractérisé les PFAS dans 47 produits résiduaux organiques (PRO) qui provenaient de 6 sites de l'observatoire de recherche SOERE PRO et couvrant une période allant de 1976 à 2018. Sur ces produits, 160 PFAS répartis en 42 classes de composés ont été détectés par chromatographie liquide ultra-haute performance couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (UHPLC-HRMS). Les niveaux observés de PFAS ciblés étaient faibles dans les PRO d'origine agricole, tels que les lisiers de porc, les litières de volailles ou les fumiers de bovins (somme médiane des PFAS de 0.66 µg/kg de matière sèche). Des niveaux plus élevés de PFAS ont été retrouvés dans les PRO d'origine urbaine et industrielle, tels que les boues de papeterie, les boues urbaines ou les composts d'ordures ménagères (somme médiane des PFAS de 220 µg/kg de matière sèche). Les composts de biodéchets issus de collecte sélective et les digestats de méthanisation de déchets urbains présentaient les plus faibles teneurs en PFAS parmi les PRO urbains. Cette étude apporte un éclairage sur les risques de contamination par ces contaminants émergents pour un panel de 47 PRO représentatifs des gisements nationaux et fournit des références pour les acteurs de la recherche et du recyclage agricole des PRO.



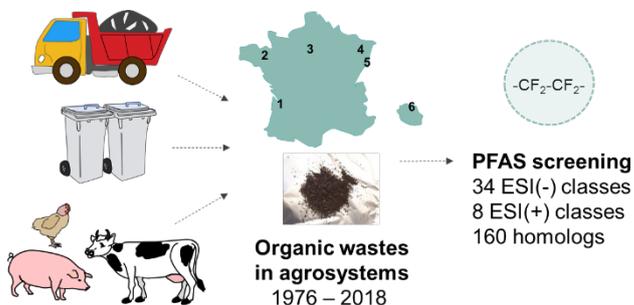
CONTEXTE ET ENJEUX

Depuis les années 1950, les composés perfluorés (PFAS) ont été massivement utilisés pour produire divers matériaux de revêtements, des produits de consommation courante tels que des cosmétiques, des emballages alimentaires et des textiles, ainsi que dans les mousses anti-incendie. Ces composés présentent une stabilité thermique et chimique élevée ainsi que d'excellentes propriétés tensioactives qui expliquent leur succès industriel. Cependant, les PFAS sont également caractérisés par une grande récalcitrance lors des traitements des eaux usées et potables, ainsi que par une grande persistance dans l'environnement. Certains composés sont bioaccumulables et présentent par ailleurs une toxicité avérée (immunotoxicité, hépatotoxicité, cancérogénicité) et sont des perturbateurs endocriniens, tels que le PFOS (sulfonate de perfluorooctane). Les études scientifiques évaluant les risques de contamination par les PFAS se sont multipliées depuis les années 2000. Elles ont mis en évidence la présence globale dans l'environnement de composés tels que le PFOS et le PFOA (acide perfluorooctanoïque), en particulier dans des zones géographiques proches d'industries et de grandes agglomérations urbaines. Peu d'information existe pour les nouvelles classes de composés non-réglés en particulier concernant les apports aux sols agricoles et les risques associés. Peu ou pas d'études internationales ont été menées pour identifier les risques d'apports aux sols agricoles via le

recyclage des produits résiduels organiques (PRO), notamment ceux d'origine agricole tels que les effluents d'élevage mais aussi les nouveaux produits urbains.

RÉSULTATS

Pour la première fois, cette étude informe que les boues urbaines et les composts urbains d'ordures ménagères résiduelles peuvent être un vecteur significatif d'entrée de nouveaux PFAS (zwitterioniques et cationiques) dans les sols agricoles. Les effluents d'élevage (bruts ou traités) sont quant à eux peu ou pas contaminés, tout comme les composts de biodéchets issus de collecte sélective et les digestats issus de déchets urbains. Les PFAS majoritairement retrouvés dans les anciennes boues urbaines et les anciens composts de boues et d'ordures ménagères (1976-1998) étaient des PFAS actuellement interdits ou restreints d'utilisation par les réglementations tels que le PFOS. Les PRO urbains plus récents (2009-2018) sont davantage contaminés par de nouvelles classes de composés non-réglés tels que des fluorotélomères sulfonamidopropyl bétaines qui sont également observées en France dans les eaux résiduelles de certaines industries et dans les sédiments de bassins versants proches d'aéroports.



©Munoz et al., *Environmental Science & Technology*, 2021

PERSPECTIVES

Des travaux sont en cours au niveau international pour étudier la toxicité des nouveaux PFAS et pour combler les manques de données permettant d'évaluer le devenir environnemental de ces contaminants émergents. Les risques de transferts des PFAS vers les sols, les cultures et dans les eaux sont en cours d'évaluation sur les sites de l'observatoire de recherche SOERE PRO. Ces données sont essentielles pour assurer l'efficacité et la sécurité des pratiques du retour au sol de divers PRO.

VALORISATION

> Gabriel Munoz, Aurélia Marcelline Michaud, Min Liu, Sung Vo Duy, Denis Montenach, Camille Resseguier, Françoise Watteau, Valérie Sappin-Didier, Frédéric Feder, Thierry Morvan, Sabine Houot, Mélanie Desrosiers, Jinxia Liu, and Sébastien Sauvé, 2021, Target and Nontarget Screening of PFAS in Biosolids, Composts, and Other Organic Waste Products for Land Application in France. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03697>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> https://www6.inrae.fr/valor-pro_eng/Experimental-devices



Contact : Aurélia Michaud

Unités : UMR SAS, UMR EcoSys

Département : AgroEcoSystem

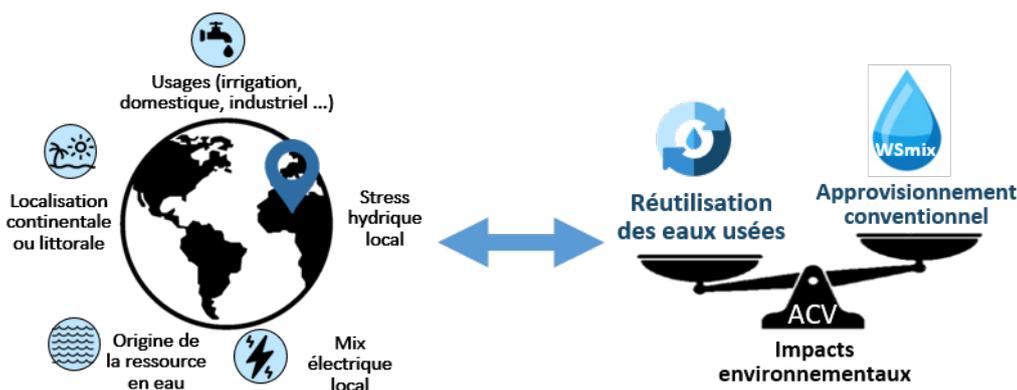
Centres INRAE : Bretagne-Normandie, IdF Versailles-Grignon

Mots-clés : Composés perfluorés, contaminant émergent, observatoire, produits résiduels organiques



L'analyse du cycle de vie pour évaluer l'efficacité environnementale de la réutilisation des eaux usées

Dans le contexte du changement climatique, la réutilisation des eaux usées constitue une ressource en eau alternative pouvant répondre aux problèmes actuels et futurs de pénurie pour des usages variés, majoritairement agricoles (irrigation) mais aussi industriels, voire même domestiques. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet d'évaluer si les éventuels bénéfices environnementaux de la réutilisation des eaux usées (préservation de la ressource en eau) sont supérieurs aux impacts environnementaux des technologies mises en œuvre. Les études ACV publiées montrent une grande hétérogénéité des hypothèses retenues et une application à des cas spécifiques ne pouvant pas être extrapolés à toutes les situations de réutilisation des eaux usées (zones littorales/continentales, climats arides/tempérés, etc.). Un cadre conceptuel homogène et robuste a été proposé, applicable à une grande diversité de situations. Il définit un périmètre du système adapté, un bilan hydrique transparent ainsi qu'un système de référence standardisé d'approvisionnement en eau pour les comparaisons. Ce cadre a été appliqué à la réutilisation des eaux usées urbaines pour l'irrigation, à une échelle globale sur des archétypes de situations et de sites contrastés. Les résultats mettent en évidence les paramètres qui déterminent l'éco-efficacité de la réutilisation des eaux usées par rapport à un approvisionnement issu de la ressource locale permettant ainsi d'identifier les situations où cette alternative est pertinente sur le plan environnemental : par exemple, en cas d'utilisation d'eaux souterraines non renouvelables, en région aride et/ou littorale ou si le traitement de régénération est peu énergivore.



Résumé graphique

Dans quelles conditions la réutilisation des eaux usées est-elle meilleure sur le plan environnemental que l'approvisionnement conventionnel en eau selon une approche ACV ?

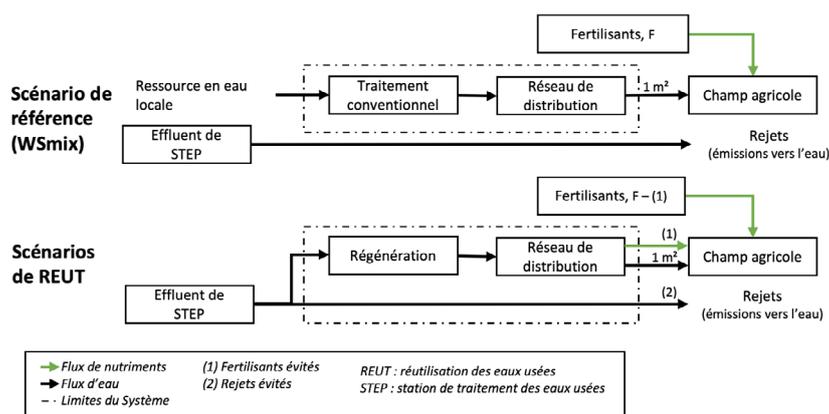
CONTEXTE ET ENJEUX

Dans le contexte du changement climatique, l'évolution de l'état des ressources en eau est devenue une question d'importance mondiale. La réutilisation des eaux usées représente une réponse prometteuse aux problèmes de pénurie d'eau, notamment pour l'agriculture dont l'approvisionnement en eau correspond à plus de 70% des prélèvements d'eau dans le monde (FAO, 2016). La pertinence d'un approvisionnement en eau recyclée, en alternative à une ressource locale, dépend d'aspects économiques mais aussi environnementaux.

Par conséquent, il est nécessaire d'identifier les conditions pour lesquelles les impacts environnementaux de la réutilisation des eaux usées (énergie, infrastructure, etc.) sont inférieurs aux bénéfices attendus (économie de ressources en eau et de nutriments dans le cas de l'irrigation). L'analyse du cycle de vie (ACV), en tant que méthode holistique et multicritère, permet d'évaluer l'efficacité environnementale de la réutilisation des eaux usées, en prenant en compte les impacts de privation d'eau, la nature des technologies de traitements nécessaires et les consommations énergétiques. Une revue de la littérature a mis en évidence deux défis : (i) l'hétérogénéité des hypothèses des études ACV de réutilisation des eaux usées et (ii) le fait que la plupart des études de cas concernent des zones côtières et arides.

RÉSULTATS

La présente étude a d'abord clarifié comment calculer l'eau consommée et/ou économisée sur la base d'un bilan hydrique massique entre prélèvements et rejets, démontrant ainsi que la réutilisation des eaux usées ne permet pas toujours d'économiser de l'eau. Ensuite, un cadre méthodologique robuste et homogène a été défini afin de permettre d'évaluer l'efficacité environnementale de la réutilisation des eaux usées en tant qu'alternative à un scénario de base d'approvisionnement en eau (Leão et al., 2018). Ce cadre a été déployé à travers un cas d'application représentatif de la réutilisation des eaux usées (réutilisation d'effluents urbains pour l'irrigation agricole) dans des environnements contrastés mais génériques (rareté de l'eau, localisation continentale ou littorale, origine de l'eau et nature du mix électrique). Les situations où cette alternative est clairement une solution d'approvisionnement bonne pour l'environnement ont été identifiées : par exemple, utilisation d'eaux souterraines non renouvelables, région aride, emplacement littoral, traitement de régénération peu énergivore. D'autre part, l'étude distingue également les situations où la réutilisation des eaux usées est moins éco-efficace que la ressource locale (stress hydrique faible, situation continentale, régénération nécessitant des traitements tertiaires avancés), ainsi que celles où il n'est pas possible de conclure.



Limites des systèmes étudiés : scénario de référence (WSmix, water supply mix) et de réutilisation des eaux usées (REUT)

PERSPECTIVES

Les perspectives de recherche consisteraient à étendre cette étude à d'autres cas de réutilisation des eaux usées moins courants que celui étudié, d'intégrer le devenir des pathogènes dans l'ACV et d'étudier plus en détail les futures stations d'épuration dont l'objectif ne serait plus de traiter un déchet mais plutôt de valoriser des ressources précieuses comme l'eau et son contenu en énergie et en nutriments.

VALORISATION

> Maesele C, Roux P (2021) An LCA framework to assess environmental efficiency of water reuse: Application to contrasted locations for wastewater reuse in agriculture. J Clean Prod 316:128151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128151>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > FAO, 2016. Base de données principale d'AQUASTAT. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)
- > Leão, S., Roux, P., Núñez, M., Loiseau, E., Junqua, G., Sferratore, A., Penru, Y., Rosenbaum, R.K.R.K., 2018. A worldwide-regionalised water supply mix (WSmix) for life cycle inventory of water use. J. Clean. Prod. 172, 302-313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.135>



Contacts : Camille Maesele, Philippe Roux

Unité : ITAP

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : Evaluation environnementale, ACV, empreinte eau, nexus eau-énergie



Le rapport isotopique carbone 13 / carbone 12 dans les jus de raisin pour estimer le réservoir utile en eau des sols viticoles



*Le réservoir utile d'un profil de sol viticole, à proximité des ceps analysés
© JL Belotti, INRAE*

Les projections de changement climatique font craindre un stress hydrique accru pour de nombreuses productions agricoles, dont la vigne en milieu méditerranéen. Le réservoir utile en eau des sols est essentiel pour comprendre et modéliser l'alimentation hydrique des plantes, en vue d'atténuer l'impact du changement climatique. Depuis de nombreuses années, le stress hydrique de la vigne a été caractérisé par un indicateur simple d'utilisation, le rapport isotopique du carbone 13 par rapport au carbone 12, appelé $\delta^{13}C$. L'utilisation de cet indicateur pour estimer le réservoir utile en eau du sol est nouvelle. Elle repose sur le fait que la vigne est une plante pérenne qui s'enracine profondément, son alimentation hydrique étant ainsi directement corrélée à l'ensemble du réservoir en eau du sol. Les résultats obtenus sur une large gamme de sols viticoles méditerranéens montrent une bonne estimation du réservoir en eau. L'utilisation de cet indicateur nécessite cependant de choisir une année pour laquelle la recharge en eau hivernale du réservoir est effective afin de ne pas le sous-estimer.



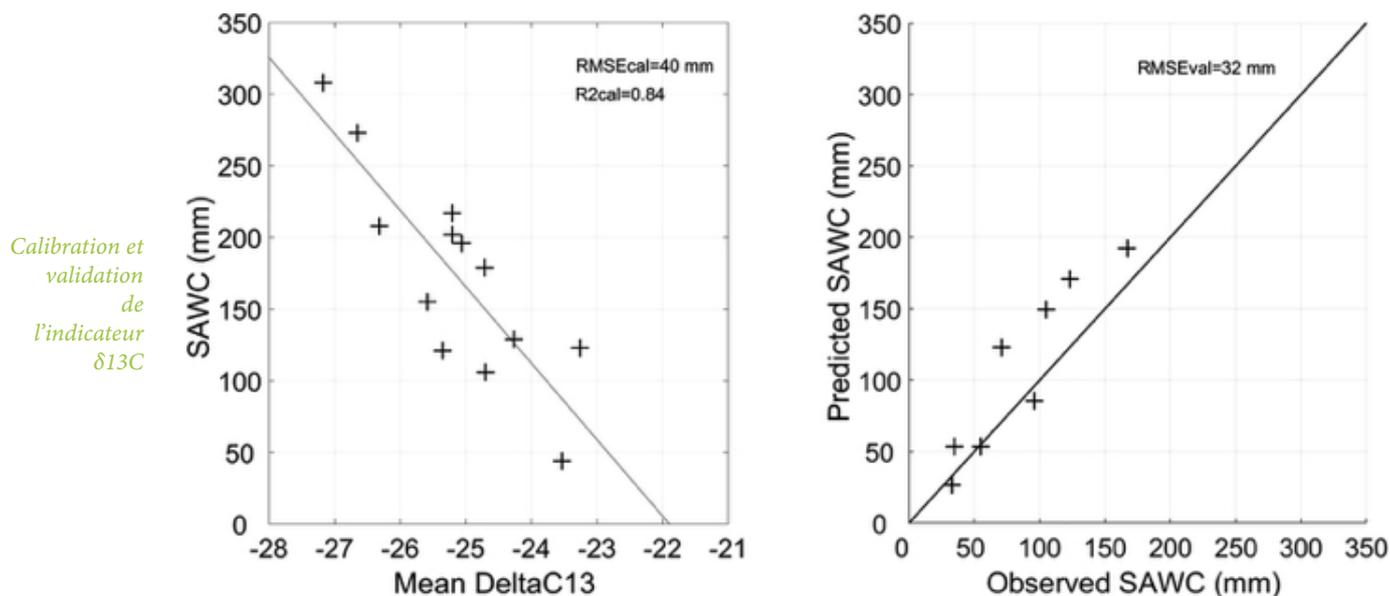
CONTEXTE ET ENJEUX

Le réservoir utile en eau des sols (RU) est un concept essentiel pour comprendre et modéliser l'alimentation hydrique des plantes. Il est utilisé comme paramètre de premier ordre dans les modèles de culture, pour l'évaluation de la qualité des terres agricoles, et pour l'estimation des services écosystémiques liés aux sols. Il correspond au volume maximal d'eau potentiellement extractible par les plantes qu'un sol peut stocker. Le projet ANR RUEdesSOLS (2015-2019) a permis d'aborder le concept de réservoir utile des sols sous différents aspects, pour en définir les contours, notamment en lien avec la capacité variable des plantes à extraire l'eau du sol, en fonction de la profondeur de leur système racinaire. Malgré son intérêt majeur, le RU est assez rarement disponible dans les bases de données car il nécessite une connaissance simultanée de plusieurs propriétés de sols dont certaines sont difficiles à caractériser, comme la densité apparente et la profondeur de sol. Par ailleurs, les estimations actuelles du RU ne prennent pas toujours en compte les contributions des horizons profonds des sols. Ce travail avait comme objectif de tester le rapport isotopique du carbone 13/carbone 12 (appelé $\delta^{13}C$), un indicateur éco-physiologique de stress hydrique de la vigne bien connu et simple à mesurer, pour estimer le RU des sols viticoles.

Malgré la dépendance de cet indicateur aux pratiques culturales et aux conditions climatiques, l'enracinement stable et profond d'une vigne en place permettait d'envisager une bonne estimation du réservoir utile dans sa globalité.

RÉSULTATS

Treize points de mesures ont été sélectionnés pour représenter une large gamme de RUs dans un bassin versant viticole méditerranéen. Le RU a été caractérisé finement par des descriptions, prélèvements et mesures en laboratoire. Le $\delta^{13}C$ a été mesuré durant quatre années successives dans le jus des raisins de pieds de vignes proches du point de mesure. La calibration de la relation entre le $\delta^{13}C$ moyen et le réservoir utile est très satisfaisante, avec une erreur moyenne de 40 mm sur le réservoir utile, qui correspond aux incertitudes de mesure en laboratoire, à la spécificité de chaque année de mesure, et à la mauvaise prise en compte des horizons d'altération du matériau parental. Cet indicateur a été validé dans un vignoble présentant un environnement géo-pédologique très différent de celui utilisé pour la calibration. Cependant, une sous-estimation du RU a été observée pour les sols à fort RU dans le cas d'une année à sécheresse sévère et faible recharge du réservoir en période hivernale, révélant ainsi l'importance de sélectionner soigneusement l'année de mesure.



PERSPECTIVES

Une application de cette approche à d'autres cultures est envisageable, à condition que le système racinaire puisse prospecter une grande partie du réservoir disponible. Dans le cas contraire, on pourrait imaginer un indicateur inféodé aux limites de prospection racinaire de la plante étudiée.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Coulouma, Guillaume, Laurent Prévot, Philippe Lagacherie, 2020. Carbon isotope discrimination as a surrogate for soil available water capacity in rainfed areas: A study in the Languedoc vineyard plain. *Geoderma* 362 : 114-121.



Contact : Guillaume Coulouma

Unité : LISAH

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : Réservoir utile du sol, sol viticole, rapport isotopique du carbone, profondeur de sol



Effets positifs, directs et hérités, de l'introduction de prairies temporaires sur la conservation de la biodiversité des sols et services écosystémiques

L'introduction de prairies temporaires dans une rotation de cultures annuelles est reconnue pour améliorer les services écosystémiques du sol ; cependant i) peu de travaux portent sur l'effet multi-services des prairies et, ii) les effets hérités de ces prairies restent peu connus. Dans ce contexte, en s'appuyant sur l'expertise d'un consortium de chercheurs européens écologues et économistes (Biodiversa- SoilMan <https://soilman.eu/>), cette étude a évalué les effets hérités de l'introduction de prairies temporaires dans une rotation de cultures annuelles sur un bouquet de services écosystémiques : (i) maintien de la structure du sol, (ii) régulation hydrique, (iii) conservation de la biodiversité des sols, (iv) régulation d'agents pathogènes et (v) production fourragère. Bénéficiant du dispositif SOERE-ACBB (INRAE, AllEnvi), trois types de rotations ont été comparés : rotation de cultures annuelles sans prairie, rotation incluant 50% de prairies (3 années de prairie continues dans la rotation), ou 75% de prairies (6 années de prairies continues). Les résultats montrent que l'introduction des prairies améliore, quelle que soit la durée de la prairie dans la rotation, le maintien de la structure du sol et la conservation de la biodiversité, mais ne modifie pas la régulation hydrique et ne favorise pas la régulation du pathogène étudié. L'effet hérité bénéfique des prairies, plus important dans la rotation incluant 6 années continues de prairie, est observé sur le maintien de la structure du sol et la conservation de la biodiversité, mais en revanche aucun effet hérité n'est observé sur la régulation hydrique, la régulation de l'agent pathogène étudié ou la production fourragère.

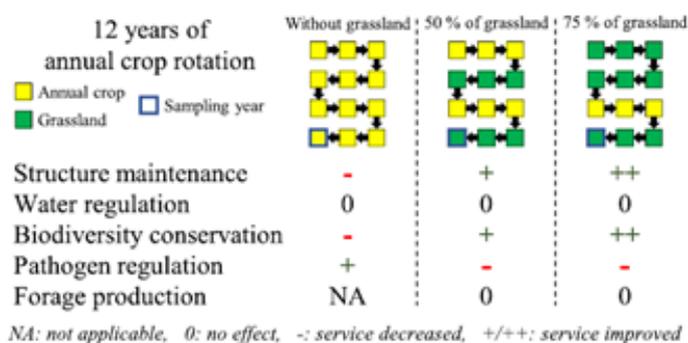


CONTEXTE ET ENJEUX

Dans un contexte de changement climatique et de transition agroécologique, l'évaluation des effets des prairies dans les rotations annuelles de cultures présente un intérêt certain. La littérature met en avant que l'introduction de prairies temporaires dans une rotation annuelle améliore les services écosystémiques du sol. Cependant i) peu de travaux portent sur l'effet multi-services des prairies et, ii) les effets hérités de ces prairies restent peu connus. Dans ce contexte, le but de la présente étude menée dans le cadre du projet européen Biodiversa-Soilman (<https://soilman.eu/>) était d'évaluer les effets hérités de l'introduction de prairies temporaires dans une rotation annuelle de cultures sur un bouquet de services écosystémiques, en s'intéressant conjointement à cinq services écosystémiques et en mobilisant des indicateurs proxy de ces services : (i) maintien de la structure du sol (stabilité structurale), (ii) régulation hydrique (conductivité hydraulique), (iii) conservation de la biodiversité (biomasse et activité métabolique microbiennes, champignons mycorhiziens à arbuscules, communautés d'invertébrés : enchytréides, collemboles, lombriciens), (iv) régulation de l'agent pathogène (*Verticillium dahliae*) et (v) production fourragère. Bénéficiant du dispositif SOERE-ACBB de Lusignan (INRAE, AnaEE) mis en place depuis 2005, trois rotations ont été comparées après 12 années d'expérimentation : rotation de cultures annuelles sans prairie, rotation de cultures annuelles incluant 50 % de prairies (correspondant à 3 années de prairie continues dans la rotation), rotation de cultures annuelles avec 75% de prairies (6 ans de prairies continues dans la rotation).

RÉSULTATS

Les résultats ont montré que l'introduction des prairies dans une rotation de cultures annuelles améliore, quelle que soit la durée de la prairie, la stabilité structurale du sol et la conservation de la biodiversité, l'ensemble des taxa en bénéficiant, mais elle ne modifie pas la régulation hydrique et présente un sol moins suppressif au pathogène étudié. L'effet positif hérité de 75% de prairie dans la rotation vs 50% s'observe sur la stabilité structurale (+16%) et sur des paramètres de certains taxa (biomasse microbienne, équitabilité et structure spécifique des champignons mycorhiziens, abondance des collemboles épi-édaphiques, abondance des enchytréides...), mais aucun héritage du passif prairial n'est observé sur les communautés lombriciennes, ni sur la régulation hydrique, la régulation du pathogène étudié ou la production fourragère. Par une approche multi-services écosystémiques originale, cette étude a mis en évidence l'effet positif des prairies ainsi que l'effet hérité de ces prairies, tout en soulignant les réponses contrastées selon le paramètre/service considéré. Ainsi, cette étude a confirmé l'effet positif des prairies et de l'héritage de prairies sur le maintien de la structure du sol, mais elle a aussi souligné l'absence d'effet positif de la prairie sur la régulation hydrique. Notre étude a aussi mis en avant la réponse positive de la composante biologique, incluant méso et macro-faune, dès trois années de prairies dans la rotation, renforçant les résultats récents sur la rapidité de la réponse biologique (Hoeffner et al., 2021b), tout en soulignant le bénéfice de l'héritage prairial sur la conservation de la biodiversité.



Résumé graphique illustrant l'effet de l'introduction des prairies dans les rotations culturales annuelles sur cinq services écosystémiques © Hoeffner et al., 2021

Campagne de prélèvements des communautés lombriciennes et mesure d'infiltration. Dispositif SOERE ACBB. Projet Biodiversa-Soilman

PERSPECTIVES

Les résultats de la présente étude soulignent l'intérêt de prendre en compte l'effet des prairies et l'héritage de ces prairies sur du long terme, ainsi que la nécessité de prendre en considération les effets sur un ensemble de services écosystémiques. Cette approche multi-services continuera à être développée pour évaluer de manière holistique les effets de pratiques sur le fonctionnement et la durabilité des agroécosystèmes. En ce sens, la régulation des pathogènes dans les sols étant fortement conditionnée par de multiples paramètres (pathogène étudié, plante cultivée, précédent cultural) de nouvelles études seront nécessaires pour évaluer le réel effet des prairies et l'intégrer dans une évaluation holistique.

VALORISATION

> Kevin Hoeffner, Anneke Beylich, Abad Chabbid, Daniel Cluzeau, Dumitrita Dascalu, Ulfert Graefe, Gema Guzmán, Vincent Hallaire, Jörg Hanisch, Blanca B. Landa, Deborah Linsler, Safya Menasseri, Maarja Öpik, Martin Potthoff, Mignon Sandor, Stefan Scheu, Rüdiger M. Schmelz, Ilka Engell, Stefan Schrader, Tanel Vahter, Martin Banse, Annegret Nicolai, Elke Plaas, Tania Runge, Tomas Roslin, Marie-

Laure Decau, Siim-Kaarel Sepp, Luis F. Arias-Giraldo, Sylvain Busnot, Marc Roucaute, Guénola Pérès. 2021a. Legacy effects of temporary grassland in annual crop rotation on soil ecosystem services. STOTEN. *Science of the Total Environment*- 780 (2021) 146140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146140>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Hoeffner, K., Hotte, H., Cluzeau, D., Charrier, X., Gastal, F., Pérès, G. 2021b. Effects of temporary grassland introduction into annual crop rotations and nitrogen fertilisation on earthworm communities and forage production. *Applied Soil Ecology*. 162 (2021) 103893 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103893>



Contact : Guénola Pérès

Unité : UMR SAS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bretagne Normandie

Mots clés : Héritage prairial, bouquet de services écosystémiques, biodiversité des sols, régulation hydrique, stabilité structurale, production fourragère, régulation pathogènes



Le rôle des oiseaux sur les régulations biologiques des insectes en grandes cultures

Dans les champs cultivés, les oiseaux occupent souvent la position la plus élevée de la chaîne alimentaire, se nourrissant de ravageurs et de leurs prédateurs intermédiaires dans un processus connu sous le nom de prédation intra-guille. Les effets nets de la prédation par les oiseaux sur les populations d'insectes ravageurs sont difficiles à prévoir sans une description complète des communautés proies-prédateurs et de leurs interactions complexes. Nous avons échantillonné les communautés d'oiseaux et d'arthropodes dans 30 parcelles de colza aux printemps 2019 et 2020 en France (réseau Scarabée). Pour évaluer l'effet descendant des oiseaux sur les arthropodes, nous avons utilisé une expérience d'exclusion des vertébrés via des cages. En utilisant une approche taxonomique et basée sur les traits fonctionnels, nous avons déterminé les influences directes et indirectes des oiseaux sur les arthropodes épigés prédateurs et les populations d'insectes phytophages. Nous avons observé une relation négative entre l'abondance des Carabidae et les insectes phytophages, mais pas avec les autres groupes de prédateurs, ce qui suggère le rôle clé des Carabidae sur la prédation des insectes phytophages dans ces agroécosystèmes. Nous n'avons trouvé aucune preuve statistique de la prédation intraguille des oiseaux envers les prédateurs intermédiaires. Nous avons analysé l'effet des pratiques agricoles sur ces interactions multitrophiques, montrant que l'intensité des traitements phytosanitaires n'a eu que des effets néfastes sur l'abondance des Carabidae, tandis que la fréquence du travail du sol n'a pas affecté les communautés étudiées.

CONTEXTE ET ENJEUX

Dans l'objectif de remplacer totalement ou partiellement les intrants chimiques par le recours aux régulations biologiques des bio-agresseurs, il est nécessaire de mieux connaître les interactions multi-trophiques et si certaines pratiques agricoles peuvent médier ces relations. Pour identifier l'impact de la présence ou de l'absence des oiseaux sur le réseau trophique, nous avons mis en place 17 et 13 cages d'exclusion de 30 m² chacune au printemps 2019 et 2020, leur empêchant l'accès à cette surface. Nous avons comparé chaque zone d'exclusion à une zone témoin (accessible) sur chaque parcelle. Un point d'écoute « oiseaux » (réalisé en avril-mai conjointement par l'OFB, le laboratoire ESE et le Parc Naturel Régional de la Haute-Vallée de Chevreuse) a été réalisée sur chaque zone témoin. Des piégeages « barber » ont permis d'échantillonner la faune du sol au sein des zones 'cage' et 'témoin'. Nous avons considéré les oiseaux en sommet de chaîne, les araignées, les carabes et les prédateurs autres (chilopodes, staphylins, opilions) en niveau intermédiaire et les insectes phytophages (ex : méligèthe) et les proies alternatives (acariens, collemboles) au niveau trophique inférieur. L'étude de la chaîne trophique a été réalisée par une approche taxonomique (abondance des taxons) et fonctionnelle (niveau trophique et indices de diversité fonctionnelle multi-traits des prédateurs).



Photographie d'une cage d'exclusion d'oiseaux placée de février à juin sur une parcelle de colza, et photographie d'une bergeronnette printanière posée sur une hampe florale de colza

RÉSULTATS

Notre premier constat est la diversité des oiseaux rencontrés en période de reproduction dans les parcelles de colza, avec un total de 28 espèces. Cette communauté comprenait des espèces communes des milieux agricoles comme l'alouette des champs et la bergeronnette printanière et d'autres moins fréquentes dans les parcelles cultivées comme la fauvette grisette ou le bruant des roseaux. Notre second constat est l'absence de relation statistique entre les oiseaux et les autres groupes trophiques du sol dans notre étude. Ils n'auraient donc pas contribué significativement et de façon directe à la prédation des insectes phytophages, ni à celle sur les prédateurs intermédiaires. Toutefois nous ne pouvons pas exclure de prédation intraguilde sur les organismes foliaires. L'abondance des insectes phytophages dans le colza était principalement déterminée par l'abondance, le niveau trophique moyen et l'équitabilité fonctionnelle des communautés de carabes, soulignant le rôle important joué par ceux-ci dans les agroécosystèmes. L'utilisation de pesticides a eu un effet direct négatif sur l'abondance des carabes mais pas sur celle des insectes phytophages.

PERSPECTIVES

Pour aller plus loin que cette étude corrélative, l'OFB envisage d'utiliser des proies sentinelles placées dans le colza et couplées à des pièges photo pour quantifier le potentiel de prédation des insectes du colza par les oiseaux, et pour identifier les oiseaux impliqués dans cette régulation. L'analyse génétique de fèces d'oiseaux permettrait également d'évaluer si les insectes du colza font bien partie de leur régime alimentaire.

VALORISATION

Ces résultats feront l'objet de restitutions aux agriculteurs chez lesquels l'essai s'est déroulé. Plus généralement, la place des oiseaux en sommet de chaîne trophique dans les agroécosystèmes, sera abordée par les auteurs lors de participations à des manifestations sur le thème de la biodiversité à destination des agriculteurs.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Serée, Lola, Antoine Gardarin, Olivier Crouzet, Aude Barbottin, Muriel Valantin-Morison, et François Chiron. 2021. « Exploring Multitrophic Interactions in Oilseed Rape Fields Reveals the Prevailing Role of Carabidae ». *Ecology and Evolution* 11 (21): 15377-88. <https://doi.org/10.1002/ece3.8229>



Contacts : Lola Serée, Antoine Gardarin

Unité : UMR Agronomie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : IdF Versailles-Grignon

Mots clés : Prédation par les oiseaux, réseau trophique, diversité fonctionnelle



Des indicateurs pour quantifier la contribution des adventices aux services écosystémiques

Dans le cadre du projet H2020 IWPRAISE, l'UMR Agroécologie a développé une méthodologie pour estimer neuf indicateurs de la contribution des adventices aux services de pollinisation (abeilles, bourdons, syrphes) et de contrôle biologique des bioagresseurs (carabes, oiseaux, parasitoïdes) et pour évaluer leur nuisibilité pour le service de production (compétition avec la culture, difficultés à la récolte, évolution du stock semencier). La méthode est originale car si ces indicateurs sont liés aux traits des espèces adventices, ils prennent aussi en compte les conditions de croissance de la plante, c'est-à-dire la variabilité intraspécifique. Nous avons en effet montré que ces conditions (bordure vs. centre du champ, type de culture) ont un effet important sur le succès de la plante (floraison, grenaison) et sur sa phénologie (date et durée de la floraison). Ainsi, une plante d'une même espèce adventice aura par exemple une contribution aux services de pollinisation souvent bien plus importante quand elle est localisée en bordure de champ qu'en plein champ. Nous mettons à disposition de la communauté scientifique une base de données des 9 indicateurs de services écosystémiques pour 155 espèces adventices, en fonction de la culture et du positionnement dans la parcelle. Notre méthodologie nous a permis à la suite de calculer ces indicateurs sur une base de données pour plus de 1000 espèces végétales des champs cultivés ouvrant la voie à l'estimation de la contribution des adventices aux services écosystémiques dans une très large gamme de situations.



CONTEXTE ET ENJEUX

La gestion agroécologique des adventices a pour objectif de maintenir des communautés qui à la fois minimisent la nuisibilité de la flore dont le risque de pertes de rendement et maximisent la fourniture de ressources trophiques à la biodiversité fonctionnelle. Or ces services sont souvent vus comme antagonistes et il est essentiel d'identifier les systèmes de cultures à l'origine de communautés adventices offrant des compromis intéressants. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir quantifier la contribution des adventices à ces deux aspects. Des études ont quantifié le rôle des adventices pour certains de ces services pris individuellement, mais jamais de manière multicritère et sur la base de données observées au champ. La littérature indique notamment que les adventices sont des espèces exprimant une forte variabilité intraspécifique, leur permettant d'exprimer différents niveaux de croissance et de développement selon l'habitat dans lequel elles poussent, affectant ainsi leur phénologie et leurs performances en termes de fourniture de pollen, nectar, graines et de compétition vis-à-vis de la culture. Intégrer cette variabilité est donc crucial.



RÉSULTATS

Nous avons développé 9 indicateurs basés sur une analyse approfondie de la littérature scientifique. Des connaissances étaient acquises sur un nombre limité d'espèces, mais nous avons développé une méthodologie originale permettant d'affecter, sur la base de leur proximité sur de nombreux traits fonctionnels, des valeurs d'indicateurs à 155 espèces adventices dans 967 situations uniques (bordure ou centre des parcelles de six cultures) tenant compte de leur variabilité intraspécifiques observée (Yvoz et al., 2020). La méthodologie permet aussi

de quantifier ces valeurs dans de nombreuses cultures (autres que les 6 étudiées), par la prise en compte de proximité fonctionnelle des cultures dont on sait qu'elles sont le premier facteur structurant des communautés adventices.

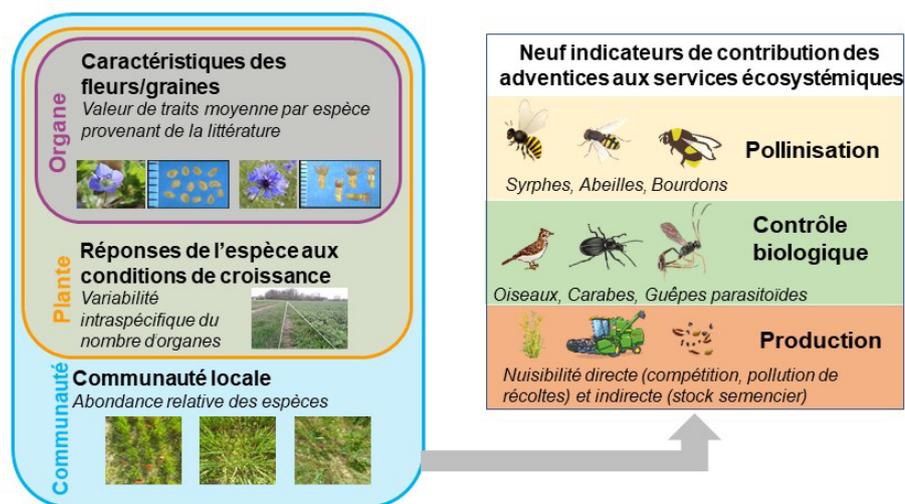


Schéma méthodologique présentant les trois niveaux d'organisation impliqués dans la construction des neuf indicateurs de contribution des adventices aux services écosystémiques © Yvoz, 2021

PERSPECTIVES

Les travaux permettent d'estimer la contribution multiservices des adventices à l'échelle des communautés adventices observées au champ, en fonction des systèmes de cultures et ainsi d'identifier les stratégies de gestion parcellaire offrant les meilleurs compromis. Les indicateurs calculés à l'échelle d'une parcelle peuvent aussi être extrapolés à l'échelle de paysages agricoles, permettant d'identifier par la suite des stratégies paysagères de gestions agricoles qui favorisent ces compromis.

VALORISATION

Ce travail a fait l'objet d'un article dans Ecological Indicators présentant la méthode et fournissant la base de données. Au-delà de cette publication, ce travail a permis de mettre en œuvre la méthodologie pour une gamme étendue d'espèces observées dans les champs cultivés (>1000 espèces) permettant de disposer de valeurs pour ces 9 indicateurs pour plus de 11 000 situations individuelles (espèces x habitat x culture).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Yvoz, S., Cordeau S., Ploteau, A. Petit, S. (2021) A framework to estimate the contribution of weeds to the delivery of ecosystem services in agricultural landscapes. Ecological Indicators 132, 108321. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108321>
- > Yvoz, S., Cordeau, S., Zuccolo, C., Petit, S. (2020). Crop type and within-field location as sources of intraspecific variations in the phenology and the production of floral and fruit resources by weeds. Agriculture, Ecosystems & Environment 302, 107082. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107082>
- > Petit, S., Yvoz, S., Ploteau, A., Zuccolo, C., Cordeau, S., In press. Advances in understanding the contribution of weeds to the functioning of agroecosystems. In: Kudsk, P. (Ed.), Advances in integrated weed management (IWM)



Contacts : Sandrine Petit-Michaut, Stéphane Cordeau

Unité : UMR AgroEcologie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bourgogne-France-Comté

Métaprogramme : EcoServ

Mots clés : Adventices, indicateurs, services de pollinisation, contrôle biologique



Déterminants paysagers des bioagresseurs des grandes cultures à large échelle

La gestion des paysages est souvent vue comme l'un des leviers à mobiliser pour améliorer la gestion des bioagresseurs. Cependant, les publications scientifiques rapportent des effets opposés des éléments paysagers selon les bioagresseurs. Dans cette étude nous mettons en relation les données d'épidémiosurveillance françaises pour 30 des principaux bioagresseurs des grandes cultures françaises et les cartographies nationales des espaces arborés et grandes cultures pour clarifier ces relations en tenant compte des variations interannuelles des surfaces cultivées. La principale tendance générale est que les bioagresseurs sont plus présents dans une culture lorsque celle-ci était cultivée sur de plus grandes surfaces dans les paysages l'année précédente. La surface de la culture hôte la même année a un effet plus complexe. Par ailleurs, aucune tendance générale protectrice n'est mise en évidence pour les espaces semi-naturels (haies, prairies, forêts) dont les effets varient selon les bioagresseurs. Il semble donc difficile de proposer des paysages suppressifs génériques. En revanche il semble possible d'améliorer la gestion des cultures dans le paysage et de prendre en compte les risques paysagers pour adapter les pratiques de protection des cultures.



CONTEXTE ET ENJEUX

Il y a de fortes attentes de la société civile sur la réduction de l'utilisation des pesticides par les agriculteurs. Plus de la moitié des volumes de pesticides est utilisée sur des grandes cultures (blé, maïs, colza, ...) et la conception de paysages limitant les abondances de bioagresseurs est envisagée par les scientifiques comme par les concepteurs de politiques publiques pour limiter le recours aux pesticides. Cependant, les éléments paysagers semi-naturels peuvent avoir des effets opposés sur les différents bioagresseurs des grandes cultures. Ici nous proposons un bilan sur 30 bioagresseurs, qui sont les principaux bioagresseurs des principales cultures de plein champ en France (Blé, Colza, Maïs, Orge, Betterave, Pomme de terre). Pour cela nous mettons en regard les observations du réseau d'épidémiosurveillance végétale de 2009 à 2017 et les cartes nationales de forêts, haies et surfaces agricoles. Le volume d'observations analysé est comparable à l'ensemble des observations rapportées dans la littérature sur l'impact des paysages sur les ravageurs des grandes cultures au moment de la publication.



RÉSULTATS

Nous observons une tendance très nette à l'augmentation de la présence des bioagresseurs avec les surfaces de culture hôte l'année précédente. Les surfaces de la culture hôte de l'année même ont un effet plus complexe opposant d'une part les maladies fongiques pour lesquels le risque a tendance à augmenter avec l'abondance des cultures hôtes, et d'autre part les ravageurs au cycle annuel pour lesquels le risque, par le jeu des variations inter-annuelles des surfaces, diminue avec l'augmentation des surfaces de culture hôte dans le paysage. Plusieurs espaces semi-naturels (bois, haies, forêts) ont des effets d'amplitudes comparables à l'effet des cultures mais de sens opposés selon les bioagresseurs, sans tendance générale sur l'ensemble. La composition des paysages a dans l'ensemble un effet plus important que les rotations intra-parcellaires sur les bioagresseurs étudiés, en l'état actuel des rotations en France. L'impact des paysages sur les présences de bioagresseurs est cependant assez faible par rapport aux effets du climat.

PERSPECTIVES

La constitution de paysages agricoles suppressifs s'appuyant sur des espaces semi-naturels ne semble pas possible si l'on veut répondre à l'ensemble des bioagresseurs présents en grandes cultures en France. Cependant, une diversification des paysages cultureux (espèces et modes de conduite) et une gestion dynamique des cultures dans le paysage suivant les évolutions pluri-annuelles des bioagresseurs pourraient être envisagées, mais seraient conditionnées à un travail de concertation territoriale. Ces travaux sont poursuivis dans le cadre du projet MoCoRiBA, financé par le plan Ecophyto (ANR-001368-P00004321), qui vise à fournir aux agriculteurs une perception locale et personnalisée du risque lié aux bioagresseurs en fonction de leurs pratiques et de leur situation géographique, limitant ainsi le recours aux produits phyto-sanitaires lorsqu'ils ne sont pas nécessaires.



*Replantation de haies d'essences mélangées en plaine céréalière.
Bord du Bassin Parisien, plateau de Saint André (27)
© Brigitte CAUVIN, INRAE*

VALORISATION

> Cet article a été en Une (« Editor's choice ») du journal *Ecography* lors de sa parution en octobre 2021 : Delaune, T., Ouattara M.S., Ballot R., Sausse C., Felix I., Maupas F., Chen M., Morison M., Makowski D., Barbu C.M. (2021). Landscape drivers of pests and pathogens abundance in arable crops. *Ecography* vol. 44 (10) 1429-1442 <https://doi.org/10.1111/ecog.05433>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Scheiner, C. and Martin, E. A. 2020. Spatiotemporal changes in landscape crop composition differently affect density and sea-sonal variability of pests, parasitoids and biological pest control in cabbage. – *Agric. Ecosyst. Environ.* 301: 107051.
- > Karp, D. et al. 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. – *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115: E7863-E7870.



Contact : Corentin Barbu

Unité : UMR Agronomie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : IdF Versailles-Grignon

Métaprogramme : SMACH

Mots clés : Paysage, bio-agresseurs, composition, grandes cultures



Diversifier les cultures booste la production, la biodiversité et les services écosystémiques

C'est le résultat d'un immense travail de synthèse réalisé par une équipe franco-néerlandaise : une compilation de 95 méta-analyses, 5 156 études et 54 554 expérimentations réparties sur 84 ans, plus de 120 types de cultures et 85 pays. La diversification des cultures entraîne une hausse de la production de 14% et de près d'un quart de la biodiversité associée. La qualité de l'eau est améliorée de 50%, la lutte contre les ravageurs et maladies de plus de 63% et la qualité des sols de 11%. Les auteurs, des scientifiques du Cirad, d'INRAE et de l'Université libre d'Amsterdam, différencient les stratégies de diversification mises en œuvre et soulignent les belles performances de l'agroforesterie.

L'article, paru le 18 juillet 2021 dans *Global Change Biology*, rassemble pour la première fois un nombre conséquent de preuves empiriques des effets positifs de la biodiversité cultivée sur les agroécosystèmes. Damien Beillouin, chercheur au Cirad spécialisé en analyse de données agronomiques et premier auteur de la publication, en souligne l'ampleur : « Jusqu'ici, la plupart des études étaient dispersées. Avec ce travail, nous synthétisons les impacts quantifiés de plus de 5 000 expérimentations de terrain, effectuées dans le monde entier, de 1936 à aujourd'hui. »

Les scientifiques détaillent les effets de cinq grandes pratiques de diversification des systèmes de culture, en fonction de la diversification dans l'espace et le temps, à savoir :

- L'agroforesterie, qui consiste à inclure dans les systèmes de culture ou d'élevage une végétation ligneuse, tels que des arbres ou des arbustes. Parmi quelques exemples, on trouve : les cultures en allées, les parcelles agricoles entourées de haies, les parcs agroforestiers, les cultures pérennes sous ombrage...
- Les cultures associées, consistent à cultiver plusieurs espèces différentes dans le même champ. Parmi quelques exemples, on trouve les cultures en relais (semis sous couvert de la culture précédente), les cultures en bandes (des bandes d'une culture et de l'autre alternent dans une même parcelle)...
- Les mélanges variétaux, lorsque plusieurs variétés de la même espèce sont cultivées en même temps dans une même parcelle.
- La rotation des cultures, soit un enchaînement récurrent d'une diversité de cultures sélectionnées, cultivées sur un même champ selon un cycle de temps prédéfini (succession régulière de cultures de vente).
- Les cultures de couvertures (ou « couvertures végétales »), qui visent à cultiver des plantes à des fins agronomiques et environnementales (par exemple, limiter les pertes en nitrates) en complément d'une culture principale, comme les cultures intermédiaires, ou les bordures entourant les parcelles cultivées.

En réalisant une analyse statistique de l'ensemble des données expérimentales disponibles, les chercheurs montrent que ces stratégies de diversification conduisent une hausse médiane de 24% de la biodiversité associée – soit la biodiversité non cultivée qui évolue au

sein d'un agroécosystème. La hausse concerne également la production (+ 14%), mais également la fourniture de plusieurs services écosystémiques comme la régulation de la qualité de l'eau (+ 51%) et du sol (+ 11%), ou le contrôle des ravageurs et des maladies (+ 63%).

	Agroforesterie	Couverture végétale	Rotation des cultures	Cultures associées	Mélanges variétaux
Production	+	+	+	+	+
Biodiversité associée	+	+	+	+	○
Qualité du sol	+	+	+	+	○
Contrôle des parasites et des maladies	+	+	?	+	?
Qualité de l'eau	+	+	?	+	?
Utilisation de l'eau	+	○	○	?	?
Emission de gaz à effet de serre	?	-	+	?	?
Efficacité de l'utilisation des intrants	?	○	?	+	?
Rentabilité	+	?	-	?	?
Qualité du produit	?	?	○	○	?
Stabilité des rendements	?	?	○	?	?

Impacts des stratégies de diversification des systèmes de culture, d'après Beillouin et al. 2021

- ⊕ Hausse significative
- Pas d'impacts
- ⊖ Impacts négatifs
- ? Manque de données



L'AGROFORESTERIE : LA STRATÉGIE LA PLUS PERFORMANTE

Certaines pratiques de diversification des systèmes de culture sont plus efficaces que d'autres : c'est ce que mettent en avant les chercheurs. « Les systèmes agroforestiers améliorent la biodiversité associée d'environ deux tiers, contre un peu plus d'un tiers pour les rotations culturales, et moins d'un quart pour les systèmes sous couverture végétale, indique Damien Beillouin. Les cultures associées et les mélanges variétaux ont, quant à eux, des impacts plus réduits, avec une hausse moyenne de 7% et 2% respectivement. »

L'agroforesterie surpasse également les autres stratégies pour la production (hausse médiane de + 35%, nettement supérieure à la hausse de + 22% estimée pour les cultures associées) ou la qualité du sol (+ 19%, contre + 11% pour les cultures associées). Les meilleurs résultats concernant le contrôle des ravageurs et des maladies sont en revanche obtenus par les systèmes sous couverture végétale (+ 125%), suivis par les cultures associées (+ 66%) et l'agroforesterie (+ 59%). Les performances de l'agroforesterie varient selon les pratiques considérées : de + 84% pour l'introduction de haies à + 40% pour les systèmes de cultures pérennes sous ombrage.

« Les stratégies agroforestières sont aussi celles qui participent le plus au stockage de carbone dans les sols, et donc à l'atténuation du changement climatique, souligne Damien Beillouin. La teneur en carbone du sol est de 19% supérieure en moyenne dans les systèmes en agroforesterie par rapport aux parcelles en conditions similaires, mais sans arbres. Les cultures associées et les systèmes sous couverture végétale ne sont cependant pas en reste, avec une hausse de 13%. »

L'agroforesterie semble donc la stratégie la plus prometteuse pour tout un panel de services écosystémiques. Les auteurs pointent le manque de données concernant, notamment, les mélanges variétaux, mais aussi l'évaluation des impacts en termes de rentabilité ou de stabilité de la production.

VALORISATION

Ce travail a reçu un financement substantiel du programme Horizon 2020 de l'Union européenne, sous la convention de subvention n° 727482 (DiversIMPACT) www.diverimpacts.net

> Base de données en ligne gratuite rassemblant les résultats chiffrés https://cropdiversification.shinyapps.io/Crop_diversification_2020

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malezieux, E., Seufert, V. and Makowski, D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*. DOI : 10.1111/gcb.15747



Contacts : Damien Beillouin, David Makowski

Unités : Cirad, UMR MIA

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : IdF Versailles-Grignon

Mots clés : Diversification agricole, agroforesterie, culture associée, mélange variétal, rotation des cultures, couverture végétale



Sélection artificielle de microbiotes rhizosphériques pour améliorer la croissance des plantes

Pour modifier le phénotype des plantes, les paysans puis les sélectionneurs se sont basés sur les semences des plantes qui présentent un phénotype d'intérêt, en les resemant d'une année sur l'autre. Les découvertes récentes sur l'influence prépondérante du microbiote sur le phénotype des plantes permettent d'envisager une nouvelle stratégie : la sélection artificielle de microbiotes modifiant le phénotype des plantes. Des enseignants-chercheurs et chercheurs de l'UMR Agroécologie ont ainsi réussi à sélectionner des microbiotes responsables d'une augmentation (jusqu'à +15%) ou d'une diminution (jusqu'à -12%) de la surface foliaire et de la concentration en chlorophylle de la plante *Brachypodium distachyon*. Pour la première fois, ils ont montré que le phénotype associé aux microbiotes sélectionnés pouvait être héritable : lorsque la structure du microbiote se stabilisait, le phénotype associé était transféré à la génération de plantes suivante.



CONTEXTE ET ENJEUX

Les progrès du séquençage haut débit et les connaissances acquises pendant plusieurs décennies attestent de l'impact des communautés microbiennes sur le phénotype des plantes, en termes de croissance, développement et immunité. Sur la base de ces connaissances, il serait intéressant de sélectionner des communautés microbiennes associées aux plantes capables de modifier le phénotype des plantes, sans changement nécessaire du génome de cette dernière. Dans une expérimentation en conditions contrôlées (Figure), conduite sur la plateforme de phénotypage haut-débit 4PMI (INRAE Dijon), le microbiote rhizosphérique de la plante *Brachypodium distachyon* a été transféré à de nouvelles plantes sur dix générations consécutives, au sein de neuf lignées indépendantes de 20 individus (soit un total de 1800 plantes). Le phénotype sélectionné était un indice de vert obtenu par photographie, combinant la surface foliaire et l'intensité de la couleur verte, qui traduit la concentration en chlorophylle. Nous cherchions à augmenter ou abaisser la valeur de cet indice, en sélectionnant les microbiotes des plantes présentant les valeurs les plus hautes ou les plus basses. Dans le traitement témoin, la sélection était aléatoire.



RÉSULTATS

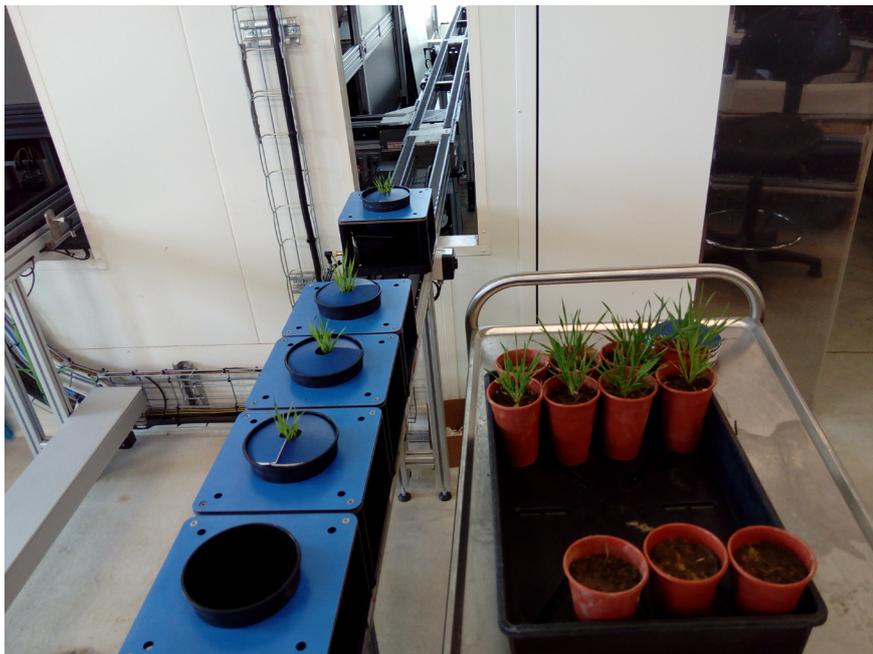
La structure du microbiote (identité et abondance des espèces) a montré de fortes fluctuations pendant une phase transitoire initiale, sans que le phénotype parental sélectionné (la valeur de l'indice de vert) ne soit transmis à la génération de plantes suivante. Après cinq générations, la structure du microbiote s'est stabilisée et, de façon concomitante, le phénotype parental a pu être transmis à la génération suivante. Cette observation, attendue d'après des modèles théoriques, montre que la stabilité de la structure du microbiote est une condition nécessaire pour que le phénotype sélectionné soit héritable. La poursuite du processus de sélection artificielle pendant dix générations a ainsi conduit à une augmentation (jusqu'à +15% dans une lignée) ou à une diminution (jusqu'à -12%) de l'indice de vert, selon la cible recherchée. Une structure différente de la communauté microbienne a été observée selon que les microbiotes rhizosphériques avaient un impact positif ou négatif sur l'indice de vert.



PERSPECTIVES

Ces résultats expliquent en partie pourquoi la sélection artificielle de microbiotes ne conduit pas toujours à un effet significatif et héritable

sur le phénotype sélectionné dans certaines études parmi les rares traitant de sélection artificielle de microbiotes. Ils mettent en évidence la nécessité de travailler sur les déterminants de cette stabilisation. Nous testons actuellement la généralité de l'effet associé au microbiote sur des espèces végétales différentes, ou dans des sols différents, afin de définir dans quelle mesure des microbiotes sélectionnés dans nos conditions expérimentales pourraient être utilisés dans des contextes différents.



Installation des plantes sur le convoyeur qui va les conduire vers la cabine de phénotypage de la plateforme 4PMI. Plus de 1800 plantes ont été phénotypées par analyse d'image pour quantifier leur surface foliaire et l'intensité de vert.

VALORISATION

Le développement de supports biotiques ou abiotiques pour inoculer les microbiotes sélectionnés sur le terrain, sans trop perturber les communautés microbiennes endémiques et le fonctionnement du sol, pourrait intéresser des partenaires industriels.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Jacquiod S, Spor A, Wei S, Munkager V, Bru D, Sørensen SJ, Salon C, Philippot L, Blouin M, 2021. Artificial selection of stable rhizosphere microbiota leads to heritable plant phenotype changes. Ecology Letters, 439601, 1-13. <https://doi.org/10.1111/ele.13916>



Contacts : Samuel Jacquiod, Manuel Blouin

Unité : UMR Agroécologie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bourgogne-France-Comté

Mots clés : Sélection artificielle, microbiote rhizosphérique, phénotype associé au microbiote, héritabilité, stabilité



Diversité fonctionnelle des cultures de diversification : des caractères phénotypiques des légumineuses à graines prédisent les compromis entre services agro-écosystémiques

La gestion de la biodiversité en agriculture est un principe fondamental de l'agroécologie. Les légumineuses à graines sont particulièrement pertinentes pour la diversification des agroécosystèmes. Pourtant, la diversité spécifique des légumineuses est peu représentée dans la plupart des systèmes de culture. Nous avons utilisé l'approche basée sur les traits phénotypiques pour quantifier la diversité fonctionnelle de 30 variétés de légumineuses, appartenant à 10 espèces, cultivées dans les mêmes conditions expérimentales. Notre objectif était de tester les relations entre les traits, le rendement et des propriétés du couvert traduisant la couverture du sol, l'acquisition et l'efficacité d'utilisation des ressources. Nos résultats ont mis en évidence des compromis entre les propriétés de l'agroécosystème associés à différentes combinaisons de traits. Cette analyse a été mise en parallèle avec une précédente étude portant sur des données similaires extraites de la littérature et provenant donc d'une gamme de conditions expérimentales et de modes de conduites plus larges. Cette comparaison suggère que certains traits ont une plasticité plus forte que d'autres en réponse à l'environnement et contribuent donc différemment à la diversité fonctionnelle des légumineuses selon les conditions d'observation. La mise en œuvre d'une telle approche basée sur les traits serait rapidement bénéfique à la sélection d'espèces ou de variétés pour fournir des services agroécosystémiques ciblés dans des conditions environnementales ou de pratiques spécifiques.



CONTEXTE ET ENJEUX

L'utilisation des légumineuses à graines pour la diversification des cultures est un moyen efficace de promouvoir des systèmes de production résilients et durables. Pourtant, la diversité spécifique des légumineuses est peu représentée dans les agroécosystèmes. Ce manque d'attention crée un risque d'érosion continue des connaissances et des ressources génétiques qui pourrait entraver d'avantage l'intégration de ces espèces dans des systèmes de culture plus diversifiés. L'approche fondée sur les traits est une approche utilisée en écologie pour relier la biodiversité au fonctionnement des peuplements végétaux et aux services des écosystèmes (Lavelle et Garnier, 2002). Cette méthodologie pourrait être appliquée aux systèmes de culture (Litrico et Violle, 2015 ; Damour et al., 2018) mais elle nécessite une vaste collecte de données pour construire des bases de données de traits pour les espèces ou variétés de cultures et documenter les relations entre les traits et les services (Barot et al., 2017). Cette étude menée en collaboration entre des chercheurs des UMR LEPSE et AbSys ainsi que des partenaires techniques du groupe semencier coopératif régional UCOSSEM avait pour objectif d'identifier les traits et/ou les combinaisons de traits des légumineuses qui pourraient être utilisées pour prédire le rendement des cultures et servir de support aux autres services rendus par les agroécosystèmes.

RÉSULTATS

Des données originales obtenues en conditions agronomiques montrent d'une part que les trente variétés de légumineuses se répartissent dans des groupes d'espèces caractérisés par différentes combinaisons de valeurs de propriétés de l'agroécosystème liées à la productivité, la couverture au sol, la fixation de l'azote, et l'utilisation de l'eau. Par ailleurs, les traits des plantes tels que la taille et la morphologie des feuilles, la teneur en azote totale de la plante, la taille des graines et la durée totale du cycle permettent de décrire et de structurer la diversité de ces variétés. Finalement, nos résultats ont mis en évidence des relations prédictives entre les propriétés de l'agroécosystème et différentes combinaisons de traits des plantes, en particulier les traits liés aux compromis entre acquisition et conservation des ressources. Le patron de variation observé était globalement en accord avec notre analyse précédente basée sur des données bibliographiques collectées dans diverses situations agronomiques (Guiguitant et al. 2020).

Cependant, les écarts observés pour certains traits comme la teneur en azote des tissus et la surface spécifique des feuilles suggèrent que la plasticité des traits en réponse aux facteurs de l'environnement est également un paramètre important pour évaluer la diversité fonctionnelle des légumineuses. Ainsi, cela suggère que l'accompagnement décisionnel pour le choix d'espèces ou de variétés par les agriculteurs et les sélectionneurs devrait prendre en compte la valeur des traits, prédite ou localement observée, selon les conditions environnementales ciblées, en particulier pour les traits plastiques qui interviennent significativement dans la prédiction du bouquet de services ciblés.



*Illustration du dispositif expérimental sur un sol argilo-calcaire profond du site ECOSEM à Lectoure (lat. 43.911158/ long. 0.666182)
© Michel E. Gahnem , Hélène Marrou*

PERSPECTIVES

Nous soutenons que l'approche basée sur les traits fonctionnels peut être plus facile à mettre en œuvre chez les espèces cultivées où l'origine et la génétique des variétés sont souvent mieux décrites et accessibles, par rapport à la très grande variabilité génétique rencontrée dans les populations d'espèces spontanées. Les traits fonctionnels pourraient être utilisés dans la sélection de variétés pour fournir des services agroécosystémiques spécifiques selon les conditions environnementales ou de pratiques.

VALORISATION

Les résultats ont motivé la réponse à plusieurs appels à projets, dont le projet Plant2Pro ECODIV.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Guiguitant J, Vile D, Marrou H. 2021 Trait diversity of pulse species predict agroecosystem properties trade-offs. *Frontiers in Plant Science*

12:636915. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.636915>

> Guiguitant J, Marrou H, Ghanem ME, Wery J, Vile D. 2020. Evaluation of pulse crops' functional diversity supporting food production. *Scientific Reports* 10: 3416. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60166-4>

> Vers une alimentation durable : Un enjeu sanitaire, social, territorial et environnemental majeur pour la France. Rapport d'information n° 476 (2019-2020) de Mme Françoise CARTRON et M. Jean-Luc FICHET, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, déposé le 28 mai 2020



Contact : Denis Vile

Unité : LEPSE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie Montpellier

Mots clés : Biodiversité, légumineuses à graines, traits fonctionnels, services agro-écosystémiques, espace phénotypique



Contribution à la conception et à la rédaction d'un handbook sur l'écologie racinaire

Les racines ont évidemment un rôle de premier plan dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres et doivent être davantage étudiées pour comprendre et maîtriser ces derniers, particulièrement dans les nouveaux contextes (usage sobre des ressources, changement climatique) qui s'imposent aujourd'hui. Pour ce faire, les méthodologies doivent être reconsidérées et standardisées. C'est l'objectif central de ce handbook, à l'usage des étudiants et des scientifiques, fondé sur un travail collectif regroupant plusieurs équipes d'experts abordant de multiples façons l'écologie et l'écophysiologie racinaire depuis de nombreuses années. Il rassemble des connaissances de base pour définir les entités fonctionnelles et les classer, des méthodes pour caractériser leurs traits importants et pour analyser et interpréter les données qui en résultent. Cet ouvrage vise également à franchir les barrières entre disciplines et objets de recherche, ce qui est absolument nécessaire pour améliorer la compréhension du fonctionnement des multiples espèces végétales concernées et des écosystèmes dans leur intégralité.



CONTEXTE ET ENJEUX

Comme les systèmes racinaires remplissent des fonctions essentielles, la caractérisation de leur structure et de leur fonctionnement est un enjeu majeur pour comprendre l'évolution des (agro)écosystèmes et pour les maîtriser dans les nouveaux contextes auxquels ils sont exposés, en particulier l'usage sobre des ressources ou le changement climatique. Mais cela reste difficile car les racines sont fines, fragiles, peu accessibles, et elles ont des fonctionnements dynamiques complexes. Il est donc essentiel d'élaborer des concepts et des méthodes partagés par des communautés de chercheurs pour optimiser les observations, les standardiser, et constituer ainsi des bases de données de qualité portant sur des traits pertinents. C'est d'autant plus nécessaire que les objets d'études (écosystèmes d'intérêt) sont eux-mêmes divers selon les équipes et qu'ils méritent largement d'être comparés pour élargir notre vision et, notamment, le champ des possibles en matière d'agroécologie. Les comparaisons restent impossibles quand les données acquises sont trop dépendantes de ces écosystèmes d'intérêt. Le projet a donc consisté d'abord à construire et à faire travailler ensemble un collectif de chercheurs spécialistes de ces questions d'écologie des racines et étudiant habituellement des écosystèmes très divers, comme les champs cultivés, les prairies ou les forêts.



RÉSULTATS

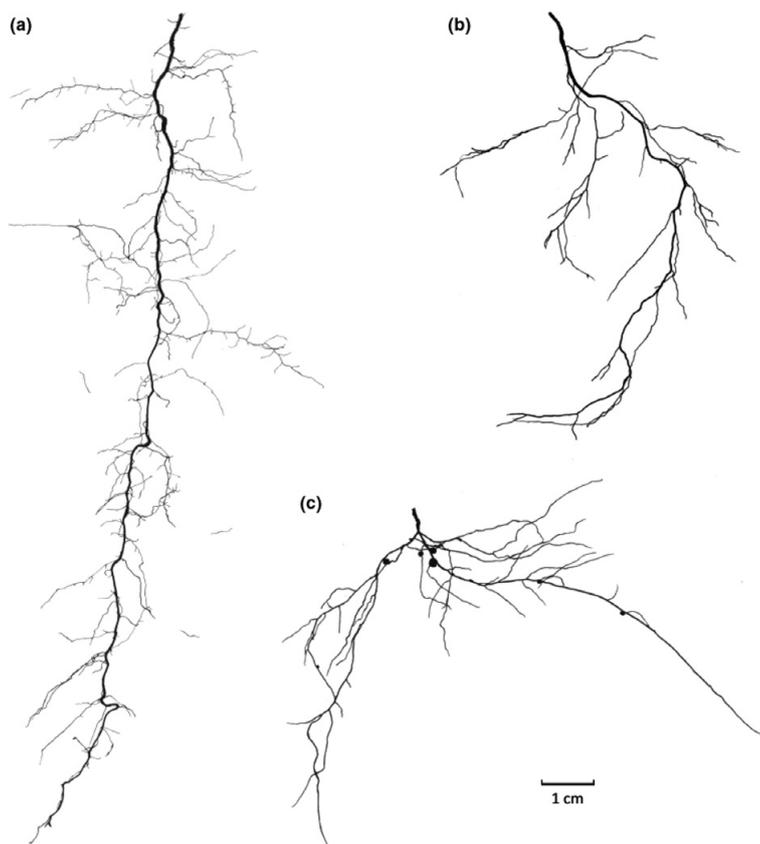
Les résultats de ce travail se présentent sous la forme d'un article de synthèse internationale de 150 pages qui prend la forme d'un « Handbook » avec des chapitres qui portent sur les concepts sous-jacents, les traits choisis et les méthodes d'acquisition de données. Il intègre sur ces différents aspects les points de vue de nombreuses équipes qui travaillent sur l'écologie des racines à travers différentes fonctions et dans le cadre d'écosystèmes divers.



PERSPECTIVES

Ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche collective et collaborative pour faire progresser nos connaissances et nos capacités à

maîtriser le fonctionnement d'une palette large d'écosystèmes plus ou moins anthropisés. Il pourra ainsi être approprié par la communauté scientifique internationale et amendé au fur et à mesure du progrès des recherches en cours.



Analyse des traits morphologiques racinaires de trois espèces herbacées :
(a) *Bromus erectus* Huds. (Poacées)
(b) *Sanguisorba minor* Scop. (Rosacées)
(c) *Lotus corniculatus* L. (Fabaceae). A noter que les nodosités sont visibles sur les racines des légumineuses mais sont généralement enlevées pour les analyses morphologiques des racines.

VALORISATION

L'article est édité par la revue *New Phytologist*, qui le rend ainsi disponible à une communauté scientifique très large.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

L'article collectif et international de synthèse contient près de 1400 références bibliographiques qui concernent les différentes thématiques abordées et qui portent sur les différents types d'écosystèmes. doi : 10.1111/nph.17572



Contact : Loïc Pagès

Unité : PSH

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Provence-Alpes-Côte d'azur

Mots clés : Racines, écologie, écophysiologie, traits, fonctionnalités



Le rafraîchissement des villes par les arbres - Le projet COOLTREES

Parmi les stratégies d'adaptation des villes au changement climatique et notamment aux épisodes de chaleur extrême, la réintroduction d'arbres en milieu urbain est une voie prometteuse car, par leur transpiration et leur ombrage, ils ont un impact significatif sur le bilan thermique de l'atmosphère environnante. Toutefois le levier « arbre » est peu connu en milieu urbain et le paysage urbain est également très hétérogène en termes de structuration et de typologie des éléments qui le constituent. Concevoir des villes durables où les aménagements arborés auront tout leur sens nécessite de mieux expliciter les interactions entre les arbres et la ville. Le projet COOLTREES a permis de mieux quantifier l'impact des arbres sur l'ambiance thermique urbaine locale via la production d'un outil de modélisation des interactions entre fonctionnement des couverts et microclimat urbain. Au-delà des aspects scientifiques, une des originalités du projet a résidé également dans l'interdisciplinarité et l'implication de partenaires divers (INRAE, CNRS, Universités Clermont-Auvergne et Strasbourg, Association Plantes & Cités, Eurométropole de Strasbourg) autour d'un objet commun: les arbres urbains, et d'un outil commun : la modélisation.



CONTEXTE ET ENJEUX

Réintroduire des arbres au sein des villes est un moyen prometteur d'adaptation des villes au changement climatique, car les arbres, par leur transpiration et leur ombrage, ont un impact significatif sur le bilan thermique de l'atmosphère urbaine. Toutefois les bénéfices thermiques potentiels des arbres dans un environnement urbain ont été peu étudiés notamment pour les arbres de rue. Ainsi la quantification des processus (transpiration vs. ombrage) et de leurs interactions avec le bâti, ainsi que l'intégration des arbres dans un outil de modélisation 3D du confort thermique humain sont essentielles pour évaluer les services écosystémiques attendus. Le projet ANR COOLTREES (2017-2021) visait à contribuer à ces connaissances, et a proposé un cadre de modélisation du rôle des arbres urbains sur le confort thermique des habitants en fonction de la structuration du paysage urbain proche, de leur environnement climatique, de leur structure et de leur réponse physiologique.



RÉSULTATS

Un outil de simulation, LASER.T, permettant de simuler l'impact des arbres sur le microclimat urbain et leur fonctionnement a été conçu (Triollet et al., 2021). Il présente plusieurs atouts vis-à-vis des modèles existants. Il simule de manière couplée les interactions thermo-radiatives entre les différents éléments d'un paysage urbain, végétation incluse, et est capable de spatialiser le microclimat au sein des houppiers. Une base de données regroupant toutes les mesures effectuées entre 2014 et 2018 sur la zone d'étude a été créée, et regroupe la géométrie des bâtiments et des arbres (acquisitions LIDAR), les données météorologiques, les flux de chaleur latente des arbres (flux de sève), et des suivis de températures de sol et de couvert. Un « data paper » rendant les données accessibles à la communauté scientifique est en cours de finalisation (Saudreau et al., 2021). L'analyse des données obtenues et l'utilisation de la modélisation ont permis de proposer une méthodologie d'estimation des traits foliaires à partir d'acquisition LIDAR (Hu et al., 2018), et de définir l'échelle minimale de représentation des arbres pour une simulation pertinente de l'effet rafraîchissant (Bournez et al, 2018, Bournez et al, 2019).



PERSPECTIVES

Le modèle LASER.T a été choisi comme outil de simulation dans le cadre d'un nouveau projet ANR, le projet TIR4sTREEt (2022-2025) porté



Département INRAE AgroEcoSystem
228 route de l'Aérodrome CS 40509
84914 Avignon cedex 9

Rejoignez-nous sur :



www.inrae.fr/departements/agroecosystem

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE