



Département
AgroEcoSystem

INRAE



Faits Marquants 2022

Agronomie et sciences de l'environnement pour les agroécosystèmes

Sommaire >

Interplay : un jeu sérieux pour co-concevoir des scénarios d'association céréale-légumineuse.....	p.4
Sécuriser la production agricole mondiale : démonstration des performances des cultures associées (Communiqué de presse).....	p.7
La viticulture française a encore un potentiel de réduction des phytos de 35% sans baisse de rendement.....	p.9
Production de soja : un climat compatible avec l'autosuffisance du continent européen (Communiqué de presse)	p.11
Comment réaliser des ateliers de conception participatifs favorisant des innovations systémiques et de rupture ?.....	p.13
La transformation de conflits autour de la transition vers une agriculture plus durable (le projet TRANSFORM)...	p.15
Concevoir des systèmes de culture diversifiés en considérant le temps long.....	p.18
Les plantes de service fournissent des services multiples dans les systèmes de culture tempérés : une synthèse de la littérature.....	p.20
La sélection au service de l'adaptation du maïs au changement climatique (Communiqué de presse).....	p.22
Régulation de l'anthocyane et de l'accumulation de sucre dans les baies de raisin par la limitation du carbone et l'application d'ABA exogène.....	p.24
« QUBS » : le nouveau programme de suivi de la qualité biologique des sols (Communiqué de presse).....	p.26
12 ^{ème} édition - Symposium international sur l'écologie des vers de terre.....	p.28
Développement de l'ingénierie pédo-faunistique pour la réhabilitation des sols dégradés - approche par les traits fonctionnels des invertébrés du sol.....	p.30
Open data : un jeu de données unique sur l'état des sols de France issu du RMQS.....	p.32
Le programme de recherches européen EJP SOIL « Vers une gestion climato-intelligente et durable des sols agricoles ».....	p.34
Vers une meilleure connaissance des stocks de carbone et d'eau : Une nouvelle méthode de mesure de la densité adaptée à tout type de sol.....	p.37

Sommaire >

Un modèle agrohydrologique pour estimer les impacts hydrologiques et agricoles des retenues d'eau.....	p.39
Un guide pratique pour évaluer le Réservoir en Eau Utilisable des sols.....	p.41
Comparer les performances environnementales de scénarios de gestion de l'eau à l'échelle des territoires : Opérationnalisation du cadre méthodologique de l'ACV territoriale.....	p.43
Exposition généralisée des petits mammifères sauvages aux mélanges de pesticides anciens et actuels dans les paysages agricoles.....	p.45
Des estimations d'impacts environnementaux plus précis à l'aide du machine learning.....	p.47
Vers le développement de composés pharmaceutiques durables : Caractérisation de la dégradation et évaluation écotoxicologique d'un analogue d'anticancéreux éco-conçu.....	p.49
Paname 2022 : des campagnes pour étudier la qualité de l'air et le climat urbain (Communiqué de presse).....	p.52
Concept-Dig : Outil d'aide à la conception des traitements des digestats agricoles en vue de leur valorisation agronomique.....	p.55
La moitié du phosphore disponible des sols agricoles mondiaux provient des engrais minéraux phosphatés.....	p.58



Exemple d'une session de jeu Interplay @ G. Martin

Interplay : un jeu sérieux pour co-concevoir des scénarios d'association céréale-légumineuse

Les associations céréale-légumineuse sont reconnues comme un des leviers d'amélioration de la durabilité de l'agriculture. Cependant, elles restent marginales en Europe à cause des nombreux défis posés par leur introduction. Interplay est un jeu sérieux permettant d'explorer une grande diversité de scénarios d'associations céréale-légumineuse et d'évaluer leur fourniture de huit services : rendement de la céréale et de la légumineuse, teneur en protéine de la céréale, fourniture d'azote, impact sur la structure du sol et contrôle des maladies, ravageurs et adventices. Interplay est utilisé par de petits groupes d'agriculteurs, accompagnés de leur conseiller, ou d'étudiants, accompagnés de leur enseignant. Il est composé d'un plateau de jeu et de cartes servant à concevoir les scénarios, constitués du contexte de la parcelle où l'association sera introduite, des objectifs fixés par l'agriculteur, des espèces à associer et de l'itinéraire technique. Un modèle informatique combinant de manière originale modèle basé sur des processus, modèle statistique et modèle expert évalue ensuite les services fournis par chaque scénario, que les joueurs comparent aux services fournis par la culture seule et aux objectifs de l'agriculteur. Les joueurs ajustent les scénarios si nécessaire. Interplay est le premier jeu sérieux qui permette d'accompagner le développement des associations céréale-légumineuse.

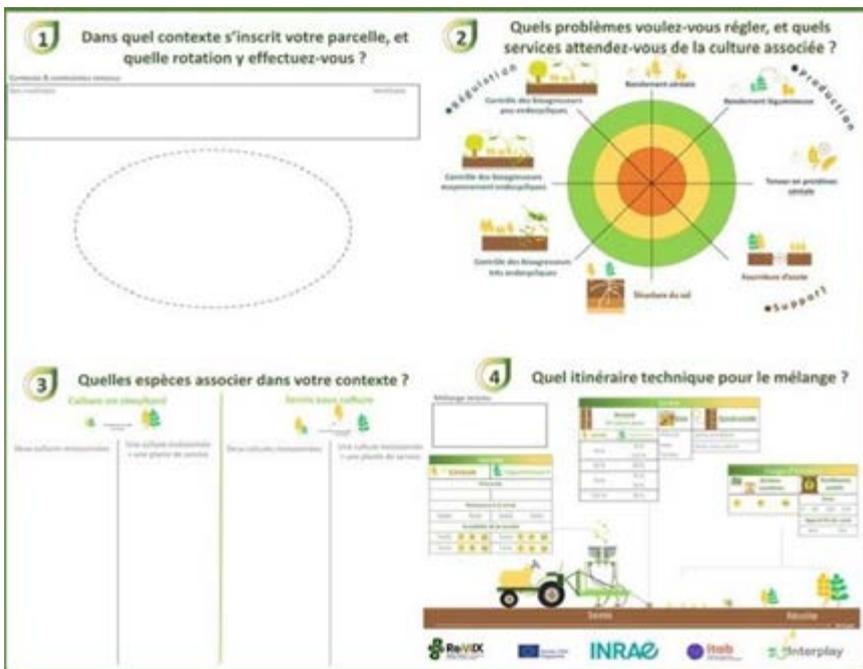
CONTEXTE ET ENJEUX

Les associations céréale-légumineuse fournissent de nombreux services écosystémiques contribuant à améliorer la durabilité de l'agriculture. Malgré cela, elles restent peu pratiquées dans les fermes commerciales européennes du fait de multiples verrous sociotechniques. L'introduction de cultures associées pose notamment de nombreux défis aux agriculteurs (par exemple : Quelles espèces associer ? A quelle densité ?), qui peinent à y répondre dans un contexte de connaissances lacunaires à tous les niveaux de la filière.

RÉSULTATS

Pour y faire face, nous avons développé Interplay, un jeu sérieux qui vise à explorer une grande diversité de scénarios d'association céréale-légumineuse et à évaluer les services fournis par chacun d'eux. Interplay est un outil pédagogique destiné à être utilisé par de petits groupes d'agriculteurs, accompagnés de leur conseiller, ou d'étudiants, accompagnés de leur enseignant en agronomie. C'est un jeu

hybride, composé d'un plateau et de cartes, et d'un outil informatique. Le plateau de jeu permet de concevoir les scénarios d'association céréale-légumineuse, composés du contexte de la parcelle sur laquelle l'association sera introduite (pédoclimat, contraintes) ; des objectifs que l'agriculteur souhaite atteindre grâce à l'association ; des espèces à associer et de l'itinéraire technique (variété, semis, intrants) choisis collectivement. Un modèle informatique évalue, à partir des choix faits sur le plateau, huit niveaux de services fournis par chaque scénario : rendement de la céréale et de la légumineuse, teneur en protéine de la céréale, fourniture d'azote, impact sur la structure du sol et contrôle des maladies, ravageurs et adventices. Les joueurs comparent ces niveaux de service à ceux de la culture pure et aux objectifs de l'agriculteur, et ajustent si nécessaire le scénario. L'outil informatique est présenté sous forme d'une interface accessible, qui dissimule une chaîne de modélisation originale combinant modèle de culture basé sur des processus, modèle statistique et modèle à dire d'experts.



Plateau de jeu Interplay @ C. Meunier

Créé pendant la pandémie de COVID-19, Interplay a été testé avec 70 étudiants ingénieurs agronomes en distanciel à cause du contexte sanitaire. Les retours des étudiants ont été enthousiastes, selon eux, « le jeu permet d'appliquer des connaissances théoriques discutées en classe » et « l'approche par essais - erreurs est très formatrice et permet d'explorer sans risques ». Ils ont également souligné l'« Approche ludique et graphique qui permet les interactions, même à distance ». Les enseignants ont reconnu les avantages pédagogiques d'Interplay, et ont notamment apprécié l'aspect interactif du jeu. Ils ont souligné que ces démarches étaient appréciées par les étudiants, ce qui les encourage à en inclure davantage dans leurs programmes de formations.

Sur le plan méthodologique, ce travail a été l'occasion de proposer pour la première fois une combinaison de trois approches de modélisation pour créer une chaîne de modélisation originale, permettant d'évaluer un bouquet de services écosystémiques fournis par une grande diversité d'associations céréale-légumineuse.

PERSPECTIVES

Interplay est le premier jeu permettant de soutenir le développement des associations céréale-légumineuse. Interplay ne s'applique pour l'instant que pour des associations céréale-légumineuse à graine en semis simultané dans une diversité de pédoclimats français. Son domaine de validité sera étendu dans le cadre d'un nouveau projet européen (IntercropValues).

VALORISATION

- > Un jeu sérieux disponible en libre téléchargement en français et en anglais (<https://forms.gle/61QGKH9opQiF54Kq8>), et déjà téléchargé plus de 80 fois
- > Deux articles scientifiques, dédiés à la description du jeu et d'un cas d'utilisation pour l'un ; à la présentation de la chaîne de modélisation pour l'autre.
- > Deux évènements de vulgarisation grand public.

Interplay, un jeu hybride combinant plateau de jeu et modèle d'évaluation @ G. Martin



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Meunier, C., Alletto, L., Bedoussac, L., Bergez, J.E., Casadebaig, P., Constantin, J., Gaudio, N., Mahmoud, R., Aubertot, J.N., Celette, F., Guinet, M., Jeuffroy, M.H., Robin, M.H., Médiène, S., Fontaine, L., Nicolardot, B., Pelzer, E., Souchère, V., Voisin, A.S., Rosières, B., Casagrande, M., Martin, G., 2022a. A modelling chain combining soft and hard models to assess a bundle of ecosystem services provided by a diversity of cereal-legume intercrops. *Eur. J. Agron.* 132. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126412>
- > Meunier, C., Casagrande, M., Rosières, B., Bedoussac, L., Topp, C.F.E., Walker, R.L., Watson, C.A., Martin, G., 2022b. Interplay: A game for the participatory design of locally adapted cereal-legume intercrops. *Agric. Syst.* 201. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103438>



Contacts : Clémentine Meunier, Guillaume Martin

Unité : UMR AGIR

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Toulouse

Mots clés : cultures associées, jeu sérieux, co-conception,
services écosystémiques



© INRAE - Christian Slagmulder

Sécuriser la production agricole mondiale : démonstration des performances des cultures associées

Face aux besoins alimentaires d'une population mondiale en croissance, sécuriser la production agricole tout en réduisant son empreinte environnementale est indispensable. La diversification des cultures est l'une des solutions agroécologiques pour intensifier durablement l'agriculture. Cependant la combinaison de plusieurs espèces cultivées dans une même parcelle agricole, une pratique traditionnelle largement utilisée dans les pays du Sud, est désormais remise en cause par l'urbanisation et le déplacement de main d'œuvre vers les villes, et reste une pratique peu utilisée dans les pays occidentaux. Devant ce constat, une équipe internationale de scientifiques issus d'INRAE, de l'université Wageningen aux Pays-Bas, de l'université d'Agriculture de Chine à Pékin et de l'université d'Agriculture de Mongolie Intérieure à Hohhot, mettent en exergue, par une analyse de 226 expérimentations agronomiques, l'intérêt objectif des cultures plurispécifiques. Des travaux parus le 3 janvier 2023 dans la revue PNAS.

Dans certains pays du Sud, on constate actuellement un recul des cultures plurispécifiques, c'est-à-dire la culture de plusieurs espèces annuelles en association sur une même parcelle agricole. Par ailleurs, cette pratique a toujours été marginale dans les pays occidentaux, où la culture monospécifique, à savoir la culture d'une seule espèce en même temps dans une parcelle, est la norme.

UNE VASTE BASE DE DONNÉES MONDIALES INTÉGRANT 226 EXPÉRIMENTATIONS AGRONOMIQUES

Afin d'évaluer objectivement l'intérêt des cultures plurispécifiques dans un contexte agricole moderne, l'équipe de chercheurs français, néerlandais et chinois a engagé une analyse approfondie de la performance productive des cultures associées, à partir d'une vaste base de données mondiales incluant les résultats de 226 expérimentations agronomiques. Cela a permis aux scientifiques de comparer les niveaux de productivité de différents types de cultures associées à ceux des cultures monospécifiques.

Après avoir analysé des données sur le rendement en grain, les chercheurs ont utilisé des données sur les calories et les concentrations en protéines dans les grains pour évaluer l'intérêt des cultures associées pour l'alimentation humaine et animale. Ils ont alors pu quantifier les différences entre cultures associées et monospécifiques, puis identifier les combinaisons d'espèces cultivées et les modes de gestion permettant d'obtenir un rendement plus élevé avec des cultures associées qu'en cultures monospécifiques.

ASSOCIER DES CULTURES : UNE PRODUCTIVITÉ ÉGALE ET SOUVENT SUPÉRIEURE DEMANDANT 19 % DE TERRES AGRICOLES EN MOINS

Cette étude montre que la culture simultanée de plusieurs espèces dans une même parcelle agricole permet d'obtenir une quantité de protéines en moyenne similaire, et même souvent supérieure, à celle que produirait l'espèce végétale la plus productive lorsqu'elle est cultivée seule (culture monospécifique).

Elle montre également que l'association de cultures augmente l'efficacité globale de la production, en réduisant les besoins en surfaces de terres cultivées de 19 % pour produire la même quantité de grains que la culture monospécifique des deux espèces de l'association. Bien que la production de grains et de calories soit inférieure de 4 % en moyenne à ce que l'on pourrait obtenir avec la culture monospécifique de l'espèce la plus productive, la production totale de protéines de l'association de cultures est toutefois similaire et même, dans 47 % des cas, supérieure à celle de la culture monospécifique la plus productive, en particulier dans les associations maïs-légumineuses cultivées avec des doses d'engrais modérées.

En réduisant les besoins en surface agricole et en engrais, cette pratique agroécologique pourrait ainsi contribuer à augmenter durablement la production agricole pour répondre aux besoins d'une population mondiale en expansion. Ces données quantitatives peuvent désormais être mises à disposition pour éclairer les futures politiques publiques agricoles à l'échelle mondiale.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- > Li C., Stomph T.J., Makowski D. et al. (2023). The productive performance of intercropping. PNAS 120 (2). DOI : <https://doi.org/10.1073/pnas.2201886120>
- > Communiqué de Presse : <https://www.inrae.fr/actualites/securiser-production-agricole-mondiale-demonstration-performances-cultures-associees>



Contact : David Makowski

Unité : UMR Mathématiques et Informatique Appliquées

Départements : AgroEcoSystem, MATHNUM

Centre INRAE : Île-de-France - Versailles-Saclay

Mots clés : Diversification agricole, agroécologie, parcelle cultivée, association de culture



La viticulture française a encore un potentiel de réduction des phytos de 35% sans baisse de rendement

Face aux préoccupations sociétales croissantes concernant l'impact des pesticides sur l'environnement et la santé, la viticulture se doit de réduire sa dépendance aux produits phytosanitaires. Le réseau DEPHY-Ferme a été créé en 2010 afin d'initier et stimuler cette transition agroécologique et répondre aux enjeux ambitieux définis dans le cadre du plan Écophyto. Avec 10 années de recul, en 2020, les données du réseau DEPHY-ferme rassemblées dans la BDD Agrosyst constituent une base très riche pour étudier les leviers de réduction des produits phytosanitaires mobilisés dans la transition vers des systèmes plus durables.

L'analyse des données pour les systèmes viticoles a permis de mettre en évidence le potentiel important de réduction rapide des pesticides pour l'ensemble de la filière viticole française, principalement grâce à un ajustement des doses à certaines périodes du cycle de la vigne ou à la substitution de produits de synthèse par des produits de biocontrôle. Cependant, une variabilité inter et intra-annuelle forte est observée entre fermes. Une diversité de trajectoires de réduction des pesticides est observée selon les leviers mis en œuvre et le degré de dépendance aux pesticides à l'entrée dans le réseau DEPHY.

CONTEXTE ET ENJEUX

L'utilisation de produits phytosanitaires est à ce jour le moyen de lutte le plus efficace pour garantir une vendange qualitative et quantitative (Pujol, 2017). Face aux préoccupations sociétales croissantes concernant l'impact des pesticides sur l'environnement et la santé, la viticulture se doit pourtant de réduire sa dépendance aux produits phytosanitaires. Une transition agroécologique est ainsi nécessaire et implique de changer les pratiques afin de parvenir à diminuer l'utilisation des produits phytosanitaires.

RÉSULTATS

Une réduction de l'Indice de Fréquence de Traitement IFT total de 33 % est observée à l'échelle du réseau DEPHY-Ferme, passant d'un IFT moyen de 12,1 à l'entrée dans le réseau autour de 2010 à 8,1 en 2019. L'analyse montre que les systèmes viticoles sont proches des tendances nationales à leur entrée dans le réseau DEPHY et s'en détachent progressivement. En 2019, 50 % des systèmes du réseau DEPHY présentent un IFT inférieur à leur référence d'au moins 40 % et ce indépendamment de la région viticole ou du contexte de l'exploitation. La baisse de l'IFT passe par une réduction de 27% des fongicides au cours des 10 années de l'étude. La forte diminution de l'IFT fongicides est associée à la mise en place de différents leviers, notamment en basculant sur des produits à base de cuivre et des produits de biocontrôle. Ainsi une augmentation de l'IFT biocontrôle est constatée, passant de 30 % d'exploitations utilisant ces produits à 75 % dès la deuxième année d'engagement dans le réseau. Les produits de biocontrôle utilisés sont principalement des produits soufrés.

Une réduction des doses d'herbicides à l'hectare a été observée grâce à deux principales techniques : un arrêt du désherbage de l'interrang mais maintien du désherbage sous le rang ou un arrêt total de l'utilisation d'herbicides. Le désherbage chimique est remplacé par du désherbage mécanique ou par la mise en place de couverts. En effet, à l'entrée du réseau, 88,8 % des systèmes étudiés utilisaient des herbicides contre seulement 51,3 % en 2019. Le travail a enfin montré que tous ces changements ne s'accompagnaient pas de baisse de rendement ni d'augmentation des coûts.



Parcelle viticole région Occitanie © Y Bouisson (UMR ABSys)

PERSPECTIVES

La baisse rapide des produits phytosanitaires du réseau DEPHY a été observée dans toutes les régions viticoles malgré une diversité de contextes et une variabilité inter-annuelle forte. Cette baisse est particulièrement importante dès l'entrée dans le réseau indiquant la rapidité et l'efficacité de mise en œuvre des leviers. Ainsi le réseau DEPHY a montré le potentiel important de réduction rapide des pesticides pour l'ensemble de la filière viticole française. Les leviers mobilisés étant bien connus des conseillers viticoles et plutôt simples à mettre en œuvre, il est possible d'imaginer que l'ensemble de la filière puisse réduire les pesticides d'au moins 35%.

VALORISATION

> Thèse Esther Fouillet – Soutenance 28 novembre 2022 (Financement région Occitanie – Ecophyto et département AgroEcoSystem) – Analyse des trajectoires de pratiques et performances de systèmes viticoles engagés dans une démarche de réduction des pesticides : le cas du réseau DEPHY.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Esther Fouillet, Laurent Delière, Nicolas Chartier, Nicolas Munier-Jolain, Sébastien Cortel, Bruno Rapidel, Anne Merot, 2022. Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network, European Journal of Agronomy, Volume 136, 126503. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126503>



Contact : Anne Merot

Unité : UMR ABSys

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : DEPHY, trajectoire, transition, pratiques, viticulture, pesticides



Production de soja : un climat compatible avec l'autosuffisance du continent européen

Les surfaces de culture de soja en Europe augmentent continuellement depuis 20 ans, mais les importations restent largement majoritaires dans la consommation du continent. AgroParisTech et INRAE se sont intéressés à la capacité du continent européen à devenir autosuffisant en soja, compte tenu des évolutions climatiques. Les scientifiques ont ainsi développé des modèles de projection en se basant sur des bases de données agronomiques et climatiques mondiales. Leurs résultats, publiés le 7 avril dans Nature food, montrent que l'Europe peut atteindre une autosuffisance de 50% à 100%, si 4% à 11% des terres cultivées européennes étaient consacrées au soja. Une telle expansion présenterait des avantages économiques et environnementaux importants et permettrait une réduction de l'usage des engrais azotés.



Actuellement, l'Europe importe près de 90% du soja qu'elle consomme, en provenance des Etats-Unis et du Brésil pour la majorité et destiné essentiellement à l'alimentation animale. Si la surface de culture de soja a quadruplé sur le continent en 12 ans, passant de 1,2 Mha en 2004 à 5 Mha en 2016, elle ne représente que 1,7% des surfaces cultivées en 2016.

Pourtant la culture locale de soja présente de nombreux avantages à la fois économiques et environnementaux. Comme les autres légumineuses, elle permet de fixer l'azote dans le sol grâce à des bactéries symbiotiques vivant dans ses racines, ce qui est bénéfique pour la culture suivante et permet de réduire l'usage des engrais azotés donc leur impact environnemental. De plus la réduction des importations diminuerait le coût et la pollution qui leur sont liées. C'est pourquoi les chercheurs d'AgroParisTech et d'INRAE se sont demandés si le continent européen pouvait devenir autosuffisant en soja et si le changement climatique pouvait favoriser, ou au contraire défavoriser, cette culture en Europe au cours des prochaines décennies.

Pour cela, ils ont développé une approche de modélisation reposant sur l'utilisation conjointe de bases de données mondiales agronomiques et climatiques et d'algorithmes d'apprentissage automatiques. Grâce à cela, ils ont pu réaliser des projections de rendement de soja à l'échelle du continent, directement à partir des données disponibles, selon différents scénarios de surfaces de cultures et en fonction des projections des conditions climatiques présentes et futures.

UNE AUTOSUFFISANCE ATTEIGNABLE EN CONSACRANT 11% DES TERRES CULTIVÉES EUROPÉENNES AU SOJA

Les résultats montrent que les surfaces agricoles européennes favorables à la culture de soja sont beaucoup plus élevées que la superficie récoltée actuellement. Les projections indiquent un rendement moyen de 2 tonnes par hectare sous les conditions climatiques actuelles, même sans irrigation ni fertilisant, et il augmenterait avec les conditions climatiques futures de +0,4 à +0,6 tonne par hectare en 2050 et 2090. Les projections montrent également un déplacement des aires les plus productives depuis le sud du continent européen vers le nord et l'est en raison du changement climatique.

A besoin de soja constant, les résultats suggèrent que l'autosuffisance en soja de 50 à 100% est atteignable en Europe, sous les climats actuels et futurs, si 4 à 11% des terres cultivées étaient consacrées au soja. Il faudrait ainsi augmenter les surfaces de cultures d'un facteur 2 à 3 pour une autosuffisance à 50% et d'un facteur 5 à 6 pour une autosuffisance à 100%. En supposant que le soja ne bénéficie d'aucune fertilisation, cette augmentation permettrait de réduire l'usage des engrais azotés de 4 à 17% sur le continent européen.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Guilpart, N., Iizumi, T. & Makowski, D. Data-driven projections suggest large opportunities to improve Europe's soybean self-sufficiency under climate change. Nat Food (2022). DOI : <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00481-3>
- > Communiqué de Presse : <https://www.inrae.fr/actualites/production-soja-climat-compatible-lautosuffisance-du-continent-europeen>



Contacts : Nicolas Guilpart, David Makowski

Unités : UMR Agronomie, UMR Mathématiques et Informatique Appliquées

Départements : AgroEcoSystem, MATHNUM

Centre INRAE : Île-de-France - Versailles-Saclay

Mots clés : Soja, autosuffisance alimentaire, modélisation, sécurité alimentaire



Comment réaliser des ateliers de conception participatifs favorisant des innovations systémiques et de rupture en agriculture ?

Résoudre les problèmes auxquels l'agriculture est actuellement confrontée nécessite des innovations de rupture. Celles-ci, difficiles à faire émerger, peuvent être stimulées par un processus de conception innovante. Dans le but d'équiper ce processus, plusieurs chercheurs ont mis en œuvre des «ateliers de conception participatifs». Toutefois, la littérature décrit mal la manière d'organiser, de mettre en œuvre et de capitaliser les ateliers de conception. Nous avons réalisé une analyse croisée de 12 études de cas d'ateliers de conception, alimentée à la fois par des données sur leur réalisation, et par des interactions collectives entre les responsables des ateliers. Guidés par les éléments théoriques des sciences de la conception, nous avons identifié les similitudes et les divergences entre les cas, et tiré des leçons méthodologiques concernant la préparation, la mise en œuvre et le suivi des futurs ateliers de conception. Notre analyse fournit de nouvelles connaissances sur les étapes clés des ateliers : définition et partage d'un objectif de conception ambitieux mais réaliste, choix des acteurs participant, rôle déterminant de la base de connaissances initiale partagée avant l'exploration, nécessité d'adapter le séquençage des réunions composant l'atelier, l'animation des ateliers de conception, et la largeur de l'exploration ; moyens de gérer, au cours du processus de conception, la nature systémique des innovations ; nouveaux critères, cohérents avec la diversité des objectifs, pour évaluer le succès d'un atelier de conception. Nos résultats montrent que les ateliers de conception favorisent la créativité collective en agriculture, et alimentent les processus d'innovation ouverte.

CONTEXTE ET ENJEUX

Des innovations de rupture sont attendues en agriculture. Or, les solutions envisagées pour atteindre de nouveaux objectifs ambitieux (ex : réduction drastique des pesticides) sont souvent limitées par un effet de fixation, qui limite la créativité. Des méthodes pour favoriser l'exploration de solutions, tout en proposant des innovations réalistes, sont donc attendues. A partir d'une analyse croisée de 12 cas d'étude d'ateliers de conception, nous avons tiré des enseignements pour organiser un atelier de conception participatif réussi. Nous avons rassemblé des documents décrivant les ateliers des 12 cas d'étude et organisé des réunions collectives dans lesquelles chaque atelier a été présenté. Cette analyse s'est appuyée sur les concepts de la théorie C-K (concept-knowledge) de la conception innovante. Même si une méthode (KCP) a été proposée dans la littérature pour organiser des ateliers, sur la base de cas d'étude issus du monde industriel, de nombreux éléments pratiques ne sont pas décrits. Notre analyse vise à les identifier et à les mettre en lumière.

RÉSULTATS

Les 12 cas d'étude ont porté sur la conception de systèmes de culture innovants ou d'outils d'aide à la décision. La réalisation de tous les ateliers de conception a comporté 3 phases : la préparation, la mise en œuvre, et la valorisation des sorties. La mise en œuvre a toujours compris une phase de « partage de connaissances » et une phase d'« exploration collective ».

Les principaux résultats concernent les trois étapes :

- (i) nous avons mis en évidence des éléments clés pour définir et partager un objectif de conception ambitieux facilitant une exploration hors des sentiers battus, mais réaliste : les sorties de ces ateliers sont généralement des objets à implémenter dans des situations réelles ;
- (ii) le choix des acteurs participant, étape cruciale dans la préparation de tous les ateliers, peut s'appuyer sur des travaux précédant l'atelier,

en particulier sur un diagnostic des usages ou un diagnostic du système sociotechnique ;
(iii) la base de connaissances initiale partagée avant l'exploration a un rôle déterminant sur le processus de conception, et son contenu doit être soigneusement préparé ;
(iv) nous avons proposé des moyens pour adapter le séquençage, l'animation des ateliers de conception, et la largeur de l'exploration ;
(v) des moyens de gérer, au cours du processus, la nature systémique des innovations, ont été précisés ;
(vi) de nouveaux critères, cohérents avec la diversité des objectifs, ont été proposés pour évaluer le succès d'un atelier de conception.
Enfin, nos recherches ont montré que les ateliers de conception favorisent la créativité collective en agriculture, et alimentent les processus d'innovation ouverte.



Atelier de conception participatif en Normandie
© Marie-Hélène Jeuffroy

PERSPECTIVES

Nous envisageons d'enrichir la démarche par l'analyse d'ateliers dédiés à la conception de systèmes agricoles, de paysages agricoles, ou d'innovations couplées visant à soutenir la transition des systèmes alimentaires. Nous pensons également intéressant de travailler sur la gestion des complémentarités avec d'autres méthodes, comme celles permettant de définir les cibles et les participants de la conception, ou d'organiser la confrontation des prototypes conçus avec la réalité.

VALORISATION

- > Un article scientifique publié
- > Un webinaire organisé par le réseau scientifique IDEAS (Initiative for Design in Agrifood Systems) et disponible en vidéo : <https://www6.inrae.fr/ideas-agrifood/Recherche/Webinaires/Webinaire-IDEAS-08-09-22>
- > Les résultats de l'article ont été présentés lors du 7^{ème} symposium de la communauté Farming Systems Design à Marrakech (30 octobre – 3 Novembre 2022) : <https://fsd7.sciencesconf.org/>
- > Des guides pour la réalisation d'ateliers participatifs de conception sont proposés par IDEAS, et un accompagnement est proposé (déjà mobilisé par des chercheurs de différents départements et meta-programmes) : <https://www6.inrae.fr/ideas-agrifood/Plateforme-d-appui/Nos-outils>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- > Jeuffroy M.H., Loyce C., Lefeuvre T., Valantin-Morison M., Colnenne-David C., Gauffreteau A., Mediène S., Pelzer E., Reau R., Salembier C., Meynard J.M., 2022. Design workshops for innovative cropping systems and decision-support tools: Learning from 12 case studies. *European Journal of Agronomy* 139, 126573. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573>



Contacts : Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marc Meynard

Unités : UMR Agronomie, UMR SADAPT

Départements : AgroEcoSystem, ACT

Centre INRAE : Île-de-France-Versailles-Saclay

Mots clés : Agroécologie, créativité, multi-acteurs
conception participative, innovation ouverte



Entretien filmé utilisant la Community Voice Method @ Pauline Geoffroy

La transformation de conflits autour de la transition vers une agriculture plus durable (le projet TRANSFORM)

Dans le projet TRANSFORM, la crise agricole actuelle (avec toutes ses pressions environnementales, économiques et sociales) a été considérée comme un conflit entre des acteurs ayant des pratiques, des valeurs, des besoins et des points de vue différents. Nous avons utilisé une approche qualitative et participative dans trois études de cas en Bourgogne Franche-Comté où il y avait des conflits autour de la gestion de l'utilisation des pesticides. Lors d'entretiens, les personnes interrogées ont répondu à une « question miracle ». Elle consistait à leur demander « À quoi ressemblerait cette agriculture transformée, qu'est-ce qui serait différent et comment ? » s'ils se réveillaient après une nuit de sommeil au cours de laquelle un miracle se serait produit. Ces entretiens filmés, dans un cadre choisi par les participants, nous ont permis de produire des court-métrages utilisés pour transmettre nos résultats avec les mots des personnes interrogées. Les films, dont l'un portait sur les visions identifiées par la question miracle, ont été projetés lors d'ateliers de transformation où les participants ont pu co-développer des approches pour minimiser les impacts négatifs des conflits. Cette approche participative a permis aux acteurs du système alimentaire d'imaginer une agriculture transformée, mieux comprendre ce qui fait actuellement obstacle à la transition vers une agriculture plus durable (aux niveaux individuel, relationnel, structurel et culturel), et quels pourraient être les leviers pour mieux mettre en œuvre la transition.

CONTEXTE ET ENJEUX

La crise socio-écologique actuelle conduit à des appels à la transformation de l'agriculture. Dans le projet TRANSFORM, l'hypothèse était que les conflits entre les acteurs du monde agricole sont la raison pour laquelle il est si difficile de parvenir à plus de durabilité. Si les conflits sont reconnus et traités, il y a plus de chances de mobiliser les acteurs du monde agricole, de trouver des espaces de solution et de transformer l'agriculture que dans les situations où ils sont ignorés. Nous avons travaillé sur trois études de cas autour de conflits liés à l'utilisation et à la réduction des pesticides en Bourgogne Franche-Comté, à savoir (a) la gestion de l'eau près d'Auxerre, (b) les relations entre l'apiculture et l'agriculture dans le Jura, et (c) les relations entre la viticulture et les riverains près de Mâcon. Nous avons utilisé des techniques transdisciplinaires innovantes telles que la réalisation d'entretiens filmés, une « question miracle » proposant à nos informateurs d'imaginer

une situation où l'agriculture serait transformée, la Community Voice Method qui consiste à restituer des résultats de recherche à travers la projection de films donnant à voir la parole des enquêtés, et des ateliers de transformation (T-Labs) favorisant le dialogue et le développement de solutions.

RÉSULTATS

À partir des nombreux échanges que nous avons eus avec différents acteurs du monde agricole (céréaliers, viticulteurs, apiculteurs, techniciens...), l'approche déployée dans le cadre du projet TRANSFORM a permis d'identifier cinq visions d'une agriculture idéale (« Reconnue », « Diverse », « Ancrée », « Prédicible », « Technologique ») et les étapes pour y accéder. Elle a également permis de mieux comprendre ce qui, d'une part, fait actuellement obstacle à la transition vers l'agroécologie (aux niveaux individuel, relationnel, structurel et culturel) et d'autre part, pourrait constituer des leviers pour mieux mettre en œuvre cette transition vers plus de durabilité. Il est ressorti de nos analyses que la majorité des facteurs ne se situent pas au niveau individuel (12%) mais sont liés à des conflits profondément enracinés au sein des communautés rurales et avec le reste de la société. En effet, ils concernent essentiellement le niveau structurel (41%) à travers duquel apparaissent notamment des enjeux de justice sociale et de rapports de pouvoir, et les niveaux culturel (25%) et relationnel (21%) qui sont aux prises avec la reconnaissance sociale de l'agriculture, la déconnexion des acteurs des mondes agricoles vis-à-vis des autres populations, et l'évolution des attentes des consommateurs.



Entretien filmé utilisant la Community Voice Method © Pauline Geoffroy

PERSPECTIVES

Les résultats du projet ont permis le développement d'un projet CESAB (Centre de Synthèse et d'Analyse sur la Biodiversité) autour des dynamiques de pouvoir dans les approches participatives (<https://www.fondationbiodiversite.fr/la-frb-en-action/programmes-et-projets/le-cesab/powerbiodiv/>) et d'une soumission à l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) en Novembre 2022. L'idée est de tester dans quelles mesures le travail autour des visions de ce que devrait être l'agriculture – en y incluant les connaissances, règles et valeurs des acteurs, y compris les plus marginalisés, du système alimentaire – peut être utilisé comme un moteur pour la mise en œuvre d'actions vers des socio-écosystèmes agricoles (SES) plus durables qui répondront aux besoins sociétaux multiples et souvent conflictuels. Afin de contribuer à la recherche sur le changement transformatif et à des transformations agricoles plus informées et durables, des initiatives issues de ce travail seront mises en place et évaluées pour en apprécier les résultats environnementaux, économiques et sociaux.



VALORISATION

> Le projet TRANSFORM et ses résultats ont été présentés aux publics concernés lors d'ateliers de transformation, ainsi que lors de cinq conférences internationales.

> Le film issu du projet (https://drive.google.com/file/d/1flkkfi1acuL_iPIJesEoWuj7720CsYqO/view) a été partagé sur la newsletter du département AgroEcoSystem. Le site du projet TRANSFORM est le suivant : <https://transform-site.hub.inrae.fr/>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Calla S., Lécuyer L., Skrimizea, E., Balian, E., Young, J.C. 2022a. Advancing food system transformation and addressing conflicts through transdisciplinary methodologies: Strengths and limitations of the Community Voice Method, T-Labs, film-making and the miracle question. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6.
- > Calla, S., Dassé, S., Lécuyer, L., Young, J. 2022b. Protection de la ressource en eau du bassin de l'Auxerrois et transformation des pratiques agricoles, *VertigO*, Volume 21 numéro 3
- > Lecuyer, L., Alard, D., Calla, S., Coolsaet, B., Fickel, T., Heinsoo, K., Henle, K., Herzon, I., Hodgson, I., Quetier, F. and McCracken, D., 2022. Conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe: Looking to the future by learning from the past. In *Advances in Ecological Research* (Vol. 65, pp. 3-56). Academic Press.
- > Young, J.C., Calla S., Lécuyer L. 2022b. Just and sustainable transformed agricultural landscapes: An analysis based on local food actors' ideal visions of agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- > Young, J.C., Calla S., Lécuyer L., Skrimizea, E. 2022a. Understanding the social enablers and disablers of pesticide reduction by farmers. *Journal of Rural Studies* 95: 67-76.



Contacts : Juliette Young, Lou Lecuyer, Simon Calla

Unité : UMR Agroécologie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bourgogne-Franche-Comté

Mots clés : Transition, co-production, agriculture, pesticides, conflits, transformation, changements, visions, freins, leviers



Concevoir des systèmes de culture diversifiés en considérant le temps long

Un article paru dans Science of the Total Environment présente les réflexions croisées de deux agronomes et d'une écologue sur la conception de systèmes de culture durables et résilients basés sur une biodiversité élevée. Deux idées principales sont au cœur de l'article : les travaux récents de l'écologie (sur les boucles de rétroaction et les effets mémoire de la diversité végétale, par exemple) sont des leviers utiles pour la conception de systèmes de culture. Les agronomes doivent donc s'en saisir, en collaboration avec des écologues ; les systèmes de culture, particulièrement ceux basés sur une biodiversité élevée, doivent être conçus en considérant leurs effets à court terme, mais également à long terme. L'article propose de réfléchir à trois fenêtres temporelles lors de la conception, dont le pas de temps long à échéance de 10-50 ans. Cette prise en compte du temps long est importante afin de s'assurer, entre autres, que tous les services écosystémiques attendus produisent leurs effets, et que les systèmes de culture soient résilients.

CONTEXTE ET ENJEUX

Face aux enjeux sociétaux, climatiques et d'érosion de la biodiversité, l'agriculture est un secteur offrant des perspectives majeures de transformation de nos sociétés. Cette ambition requiert de renouveler certains principes de la conception de systèmes agricoles surtout si l'on s'intéresse à un levier prometteur comme la diversification des cultures définie comme un ajout, intentionnel, de biodiversité fonctionnelle dans les espaces agricoles (Tamburini et al., 2020). En effet, les atouts de la diversification reposent sur des interactions biologiques complexes, dont l'étude fine permet d'explorer les effets des communautés végétales sur les dynamiques d'évolution des sols, par exemple. Le potentiel de ces interactions peut parfois mettre du temps à s'exprimer pleinement. Documenter le pas de temps long pour encourager une diversification forte est un enjeu crucial afin d'enrichir les conseils agricoles sur les systèmes de culture agroécologiques conçus pour une diversité d'environnements.

RÉSULTATS

Dans cet article d'opinion, les auteurs proposent deux idées majeures. La première est que les théories de l'écologie fonctionnelle renouvellent le cadre conceptuel d'analyse et de conception des systèmes de culture, d'abord parce que le temps long est intrinsèquement lié à cette discipline. Plus particulièrement, les écologues ont produit de nombreuses connaissances théoriques sur la diversité végétale, qu'il convient maintenant de mettre en pratique. Parmi ces connaissances, nous pouvons citer celles sur les boucles de rétroaction sol-plante qui expliquent, entre autres, que la relation productivité-diversité se renforce avec le temps. Les écologues ont développé des mesures sur ces boucles de rétroaction, plus intégratives et mécanistes que les règles de décision pour la conception de rotations, pour déterminer leur rôle et identifier celles ayant un effet positif sur les performances des écosystèmes. La conception de systèmes de culture devrait donc s'enrichir de ces indicateurs développés par les écologues.

La seconde idée porte sur la nécessité de considérer le temps long lors de la conception de nouveaux systèmes de culture, ceci afin de s'assurer que les services écosystémiques attendus ont suffisamment de temps pour se développer et produire tous leurs effets. En effet, une limite des évaluations à court terme est de ne pas suffisamment tenir compte des effets pluriannuels, ce qui devient particulièrement nécessaire lorsqu'on mobilise les boucles de rétroaction dans la conception de systèmes de culture. Après avoir défini le temps long en agriculture (10-50 ans), les auteurs proposent une liste, à compléter, de nouveaux critères à prendre en compte pour évaluer les systèmes dans ce laps de temps (par exemple, la stabilité des rendements, la résilience de l'activité microbienne). Ils alimentent aussi la réflexion sur les outils à mobiliser pour concevoir en intégrant le temps long, ce qu'illustre la figure jointe.

PERSPECTIVES

Cet article a pour ambition de développer une approche interdisciplinaire afin que l'agronomie se saisisse des théories et concepts de l'écologie et identifie les connaissances actionnables pour la conception de systèmes de culture en rupture.

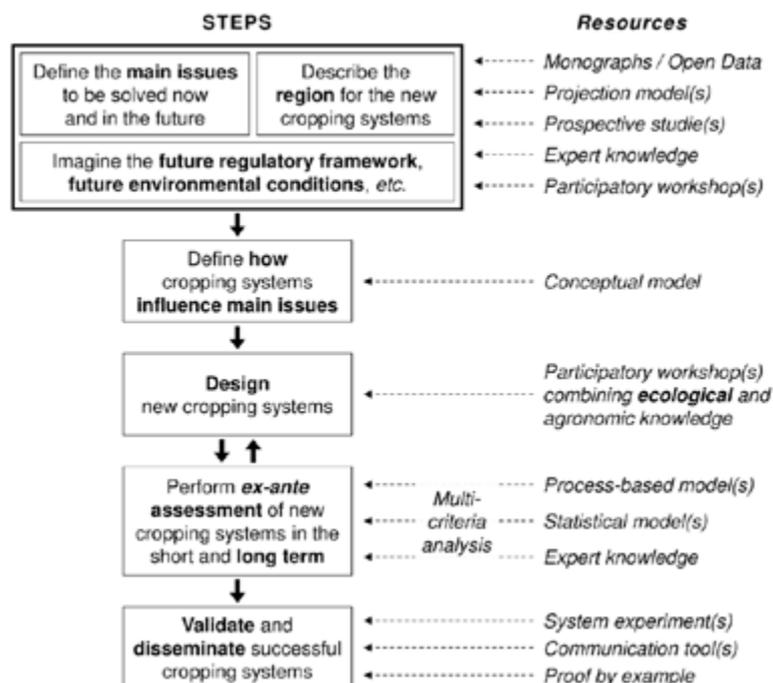
VALORISATION

En partenariat avec Arvalis-Institut du végétal, une thèse s'appuyant sur les idées développées dans cet article vient de débiter à l'UMR SAS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Matthieu Carof, Olivier Godinot, Edith Le Cadre, Biodiversity-based cropping systems: A long-term perspective is necessary, *Science of The Total Environment*, Volume 838, Part 1, 2022, 156022, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156022>

> Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T.C., Kremen, C., van der Heijden, M.G.A., Liebman, M., Hallin, S., 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances* 6, eaba1715



Proposition d'un cadre conceptuel pour la conception de systèmes de culture diversifiés, évalués sur le temps long © figure intégrée dans l'article publié dans *Science of the Total Environment*



Contact : Matthieu Carof

Unité : UMR SAS, L'Institut Agro

Département : AgroEcoSystem

Centres INRAE : Bretagne-Normandie

Mots clés : Conception, rétroaction, évaluation multicritère, trait fonctionnel



Les plantes de service fournissent des services multiples dans les systèmes de culture tempérés : une synthèse de la littérature

Les plantes de service sont cultivées, non à des fins de production, mais pour fournir des services aux cultures de vente dans le but d'améliorer les performances environnementales des systèmes de culture. Nous avons synthétisé les utilisations actuelles des plantes de service utilisées en cultures associées dans les systèmes de culture tempérés, avec les principaux services qu'elles rendent et leur gestion. Nous montrons qu'une gamme limitée d'espèces de plantes de service, principalement des légumineuses, a été étudiée à ce jour. Ce résultat suggère que la diversité des espèces et des cultivars pouvant être utilisés comme plantes de service a été peu explorée dans la littérature. En revanche, les combinaisons de plantes de service et de cultures commerciales testées semblent plus larges, notamment concernant les périodes de chevauchement temporel. Nous résumons cette diversité selon une typologie distinguant les associations synchrones, le mulch vivant et les associations en relai. Nous montrons que les plantes de service associées peuvent réduire efficacement la biomasse des adventices et les attaques de ravageurs et améliorer le cycle de l'azote, augmentant ainsi la fertilité du sol et améliorant la nutrition des cultures. L'intensité de ces services est positivement associée à la biomasse des plantes de service, mais une biomasse excessive de ces dernières augmente le risque de concurrence avec les cultures commerciales, rendant les combinaisons de pratiques indispensables à bien adapter au milieu.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les plantes de service sont cultivées, non à des fins de production, mais pour fournir des services aux cultures de vente dans le but d'améliorer les performances environnementales des systèmes de culture. Les plantes de service sont notamment associées à des cultures commerciales afin de faciliter les interactions entre les plantes, et d'optimiser la couverture du sol et la capture des ressources tout au long de l'année. De nombreux termes existent pour décrire ces pratiques, ce qui souligne leur diversité, mais cela peut être une source de confusion. Nous avons synthétisé les utilisations actuelles des plantes de service utilisées en cultures associées dans les systèmes de culture tempérés, avec les principaux services qu'elles rendent et leur gestion.

RÉSULTATS

Tout d'abord, nous montrons qu'une gamme limitée d'espèces de plantes de service, principalement des légumineuses, a été étudiée à ce jour. En revanche, les combinaisons de plantes de service et de cultures commerciales testées semblent plus larges, notamment concernant les périodes de chevauchement temporel. Nous résumons cette



Exemple de plante de service : le trèfle blanc a été cultivé en association synchrone avec le colza. Après la récolte du colza, le sol reste complètement couvert par le trèfle. Le blé sera semé dans le mulch vivant formé par le trèfle, dont la destruction partielle libèrera de l'azote pour le blé © A. Gardarin

diversité selon une typologie basée sur la temporalité des cycles. Les associations synchrones sont celles où les espèces associées présentent des cycles similaires, avec des dates de semis comparables. Dans les associations asynchrones, nous distinguons d'une part le mulch vivant, lorsque la culture de vente est semée dans une plante de service formant déjà un couvert végétal, et d'autre part les associations en relai où la plante de service est semée dans une culture de vente déjà bien développée.

Nous montrons que les plantes de service associées peuvent réduire efficacement la biomasse des adventices et les attaques de ravageurs et améliorer la disponibilité en azote, augmentant ainsi la fertilité du sol et améliorant la nutrition des cultures. L'intensité de ces services est positivement associée à la biomasse des plantes de service, mais une biomasse excessive de ces dernières augmente le risque de concurrence avec les cultures commerciales.

L'équilibre entre les services et les dis-services fournis peut être interprété principalement en termes de production de biomasse des cultures coexistantes. Ainsi, la compétition envers les adventices, le piégeage et la restitution d'azote ainsi que la perturbation du couvert végétal envers les ravageurs augmentent généralement avec la biomasse des plantes de services, mais cela accroît la compétition avec la culture de vente. L'effet résultant des plantes de service sur le rendement des cultures commerciales est variable et reflète l'intégration des effets des différents services individuels, ainsi que des éventuels services secondaires tels que l'allélopathie ou la fourniture de ressources pour les auxiliaires. La diversité des modes de gestion permet de gérer ce compromis entre la biomasse des plantes de services et celle de la culture de vente, et d'adapter le système à différentes conditions avec quelques espèces testées.

PERSPECTIVES

Nous avons restreint notre investigation aux principaux services de régulation étudiés dans la littérature scientifique. Les futurs travaux de recherche devraient s'orienter vers les services peu étudiés jusqu'à maintenant, tels que l'augmentation de la disponibilité d'éléments minéraux par facilitation, l'amélioration de la structure du sol ou la biofumigation. Il faut rester cependant vigilants envers les contraintes et les potentiels dis-services que peuvent générer les plantes de services. Enfin, il est essentiel de prendre en compte l'expérience des agriculteurs dans l'utilisation de plantes de services pour identifier des plantes de service et imaginer des modes de gestion adaptés à une diversité d'objectifs et de contextes. Ces travaux vont aider à la conception d'un outil de choix des espèces à associer (Ecosystemix) dans le cadre d'une thèse dans l'unité d'Agronomie.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Gardarin A., F. Celette, C. Naudin, G. Piva, M. Valantin-Morison, S. Vrignon-Brenas, V. Verret et S. Médiène. 2022. Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 42:39. doi. [org/10.1007/s13593-022-00771-x](https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x)



Contact : Antoine Gardarin

Unité : UMR Agronomie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Île de France - Versailles-Saclay

Mots clés : cultures associées, systèmes pluri-spécifiques, agroécologie, gestion des bioagresseurs, fourniture d'azote, compétition



La sélection au service de l'adaptation du maïs au changement climatique © Pixabay

La sélection au service de l'adaptation du maïs au changement climatique

Au cours des soixante dernières années, les programmes de sélection ont permis d'augmenter les rendements de la culture de maïs. Mais le maïs est-il adapté aux conditions climatiques actuelles et futures ? Des scientifiques d'INRAE, d'ARVALIS - Institut du végétal, de Wageningen (Pays-Bas), de Louvain La Neuve (Belgique) et de quatre compagnies semencières, Limagrain, RAGT, MAS Seeds et KW SAAT ont mené une étude comparative sur 66 variétés de maïs commercialisées entre 1950 et 2015 sur 30 champs en Europe dans différentes conditions climatiques. Leurs résultats, publiés dans Nature communications, montrent que les rendements ont augmenté rapidement, avec la même vitesse, quel que soit le climat. Les programmes de sélection visaient un même rendement moyen quelles que soient les conditions climatiques, en s'appuyant sur des caractères généraux y contribuant. Cependant dans le contexte du changement climatique, stabiliser les rendements demanderait une progression plus rapide en conditions chaudes et sèches qu'en conditions optimales. Il s'agirait donc d'inclure les caractères d'adaptation à ces conditions dans les programmes de sélection.

La sélection a fait fortement progresser les rendements du maïs au cours de ces 60 dernières années. Par exemple, un champ de maïs non irrigué qui produisait 4 tonnes de grains par hectare en année sèche dans les années 1960, en produit aujourd'hui 10 en moyenne dans les mêmes conditions. Ce progrès est lié à des caractères simples comme les durées respectives des phases du cycle de vie de la plante ou son architecture. En revanche, les caractères d'adaptation comme la sensibilité de la croissance à la sécheresse ou l'efficacité de l'eau n'ont pas progressé, bien qu'une forte variabilité génétique existe dans les différentes variétés naturelles du maïs.

Une étude a comparé 66 variétés de maïs commercialisées de 1950 à 2015 dans 30 parcelles expérimentales en Europe, qui ont été classées en scénarios climatiques allant de favorable (frais et humide) à défavorable (chaud et sec). Ces variétés ont été étudiées dans des plateformes de phénotypage qui permettent de mesurer des caractères d'intérêt pour des milliers de plantes. Les résultats montrent que les rendements ont augmenté rapidement, avec la même vitesse dans tous ces scénarios climatiques. Le progrès génétique s'est donc appliqué aux conditions défavorables attendues dans les 30 prochaines années. Jusqu'à présent, le progrès génétique s'est fondé sur des caractères qui améliorent le rendement dans toutes les conditions climatiques. Par exemple les variétés modernes fleurissent plus tardivement pour une même durée totale de cycle, ce qui laisse le temps de produire plus de grains. Elles laissent mieux pénétrer la lumière vers l'intérieur du couvert ce qui favorise la croissance des grains. L'analyse du génome montre aussi que les gènes qui pilotent ces caractères présentent des signes de sélection.

Cependant, les caractères physiologiques connus pour favoriser l'adaptation aux climats chauds et secs n'ont pas contribué au progrès génétique, comme la sensibilité de la croissance et de la transpiration à la sécheresse, ou l'efficacité de l'eau transpirée. En année sèche, ces caractères améliorent le rendement, alors qu'en année humide ils n'ont pas d'effet ou ont même un effet négatif. C'est pourquoi

ils n'auraient pas été inclus dans les programmes de sélection appliqués jusqu'à présent, car fondés sur l'augmentation moyenne du rendement quelles que soient les conditions, par le biais de caractères plus généraux. Cependant, dans le contexte du changement climatique avec une recrudescence des situations extrêmes, l'intégration de ces caractères d'adaptation dans les programmes de sélection pourrait être intéressant.

Sélectionner des caractères d'adaptation demande des méthodes combinant le phénotypage, la modélisation et la génomique qui sont actuellement élaborées et en cours d'implémentation dans les programmes de sélection.

VALORISATION

Communiqué de Presse INRAE : <https://www.inrae.fr/actualites/selection-au-service-ladaptation-du-au-changement-climatique>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Welcker, C., Spencer, N.A., Turc, O. et al. Physiological adaptive traits are a potential allele reservoir for maize genetic progress under challenging conditions. Nat Commun 13, 3225 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30872-w>



Contact : François Tardieu

Unité : UMR LEPSE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : COV, qualité de l'air, fonctionnement des écosystèmes

Photo p.22 : La sélection au service de l'adaptation du maïs au changement climatique © Pixabay



Régulation de l'anthocyane et de l'accumulation de sucre dans les baies de raisin par la limitation du carbone et l'application d'ABA exogène

L'optimisation des pratiques culturales telles que l'ajustement du rapport sources/puits est un des leviers d'adaptation de la viticulture aux changements climatiques, notamment pour limiter l'excès de sucre dans les baies à la récolte, pour diminuer le degré alcoolique des vins. Le projet CANABA visait à mieux comprendre la régulation de l'accumulation des sucres et des anthocyanes dans les baies de Cabernet-Sauvignon, en réponse à la modification du rapport surface foliaire/charge en fruits couplée à l'application exogène d'acide abscissique (ABA), sur des boutures fructifères, en serre. Trois modalités ont été appliquées : une réduction graduelle du nombre de feuilles de la bouture de 12 à 2 (une seule grappe par bouture) soit au stade 2 semaines après nouaison, soit 1 semaine avant véraison avec ou sans destruction du phloème par décortication annulaire. Les 3 modalités ont conduit à une réduction de la quantité de sucre dans les baies à maturité, ainsi que l'accumulation des anthocyanes et les niveaux d'ABA. L'application d'ABA exogène conduit à une ré-augmentation de l'accumulation des anthocyanes, en affectant peu le taux de sucre. La combinaison d'approches métabolomiques et transcriptomiques ciblées ont révélé que la limitation de la surface foliaire et l'application d'acide abscissique agissaient en synergie pour réguler l'accumulation des anthocyanes permettant d'obtenir des baies avec moins de sucre mais un taux d'anthocyane suffisant pour l'obtention de vins rouges de qualité.

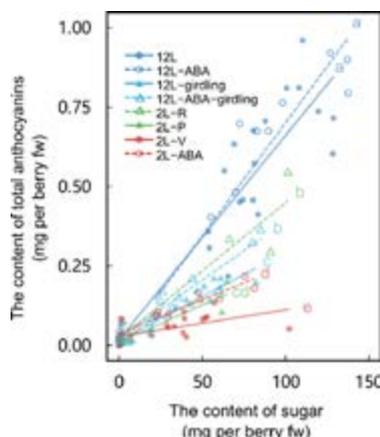
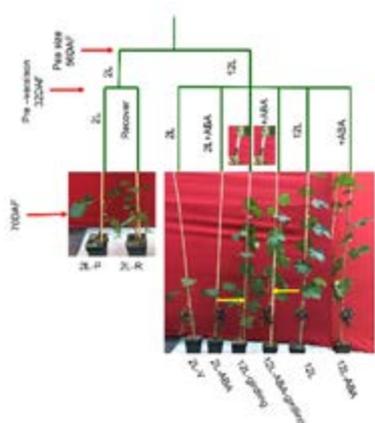
CONTEXTE ET ENJEUX

En affectant les dynamiques de maturation et la composition des baies à la récolte, les changements climatiques en cours risquent également d'affecter la qualité des vins produits. Au cours des dernières décennies, le contenu des baies en sucres a augmenté alors que le contenu en acides organiques et en anthocyanes ont diminué, conférant aux raisins un potentiel œnologique moins favorable ^[1]. La compréhension des mécanismes de co-régulation de l'accumulation des sucres, des acides organiques (malique et tartrique) ainsi que des anthocyanes, qui conditionnent la composition des baies à maturité et des pratiques culturales qui pourraient les moduler sont d'un intérêt certain pour l'adaptation de la viticulture aux changements climatiques. Afin de les étudier, une série d'expérimentations a été menée en serre sur boutures fructifères (1 seul axe végétatif et une seule grappe par bouture) de Cabernet-Sauvignon, en appliquant une réduction graduelle du rapport surface foliaire/charge en fruits (de 12 à 2 feuilles adultes pour une grappe), couplée ou non à l'application exogène d'acide abscissique (ABA) ou la destruction du phloème par décortication annulaire (« girdling »). Les fruits ont été récoltés à quatre stades de développement et l'effet des différents traitements ont été analysés par une combinaison d'analyses métabolomiques et transcriptomiques (Figure 1, résumé du déroulé du travail).

RÉSULTATS

Les résultats obtenus montrent que la réduction du rapport surface foliaire/charge en fruits lors du passage de 12 à 2 feuilles par boutures (et donc par grappe) ainsi que le « girdling » du phloème conduisent à une réduction importante (jusqu'à 60% pour les rapports les plus faibles, 2 feuilles par boutures) des sucres accumulés dans les fruits, comme attendu, mais aussi à une moindre synthèse d'anthocyanes dans la pellicule des baies au cours de leur maturation, diminuant leur potentiel œnologique. L'accumulation des anthocyanes est d'ailleurs plus fortement affectée que celle des sucres, et le profil des anthocyanes produites (rapport entre les formes di- et tri-hydroxylée, important

pour la couleur et la tonalité des vins rouges au cours de leur conservation) l'était également. En revanche, le contenu en acides organiques est peu affecté par la modification du rapport surface foliaire/charge en fruits. Ces résultats traduisent un découplage dans le temps de l'accumulation des sucres et des anthocyanes, conduisant à une baisse du rapport contenu en anthocyanes/contenu en sucres des baies à maturité. L'application exogène d'ABA (400 mg.dm⁻³) restaure partiellement le couplage de l'accumulation des sucres avec la synthèse des anthocyanes, ce qui permet d'envisager l'obtention de raisin avec des taux de sucres plus faibles mais avec un taux d'anthocyanes suffisant pour la réalisation de vins rouges de qualité.



Dispositif expérimental et résultats principaux.

Gauche : Matériel végétal et plan d'expérience (rapport surface foliaire / charge en fruits, « girdling », et application exogène d'ABA).
Droite : Relation entre production d'anthocyanes et accumulation de sucres (glucose et fructose) dans les baies, en fonction des différents traitements appliqués. © Elsevier

PERSPECTIVES

Ces travaux, réalisés en serre sur boutures fructifères, doivent maintenant être confirmés par des essais au vignoble, sur des vignes établies (5-8 ans d'âge minimum) sur une gamme de cépages, afin de vérifier leur généricité.

VALORISATION

Le contrôle et la manipulation du rapport surface foliaire/charge en fruits est déjà une pratique viticole répandue, notamment par le réglage de la charge. L'application exogène d'ABA est actuellement utilisée mais généralement sur des raisins de table et très peu sur raisins de cuve^[2].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111478>

> [1] Van Leeuwen C., Darriet P. (2016) The impact of climate change on viticulture and wine quality. Journal of Wine Economics, 11: 150-167

> [2] Koyama R., Roberto S.R., De Souza R.T., Borges W.F., Andresin M., Waterhouse A.L., Cantu D., Fidelibus M.W., Blanco-Ulate B. (2018) Exogenous abscisic acid promotes anthocyanin biosynthesis and increase expression of flavonoid synthesis genes in *Vitis vinifera* x *Vitis Labrusca* table grapes in subtropical regions. Frontiers in Plant Science, 9: 323



Contact : Eric Gomès

Unité : UMR EGFV

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Nouvelle-Aquitaine Bordeaux

Métaprogrammes : CLIMAE / LACCAVE / LIA Innogrape

Mots clés : Changement climatique, baie de raisin, composition du fruit



« QUBS » : le nouveau programme de suivi de la qualité biologique des sols

En ce mois de novembre, le Muséum national d'histoire naturelle, en collaboration avec l'université Paul-Valéry Montpellier 3, Sorbonne université, l'université de Lorraine, INRAE et Plante & Cité, lance un nouveau programme de sciences participatives : « QUBS », le suivi participatif de la qualité biologique des sols. Des protocoles de suivi scientifique simples et ludiques permettent aux participants de découvrir la faune visible de leur sol : fourmis, cloportes, mille-pattes ou encore araignées. Les objectifs du programme sont à la fois de renseigner une base de données de suivi de la qualité biologique de ces sols à l'échelle nationale et de permettre aux citoyennes et citoyens d'en apprendre davantage sur les enjeux liés à la préservation de ce compartiment de la biodiversité dont les rôles sont trop souvent insoupçonnés. Ce nouvel observatoire rejoint le programme phare de sciences participatives du Muséum, « Vigie-nature », et le programme de sciences participatives sur l'environnement urbain de Sorbonne université, « PartiCitaE ».



POURQUOI ÉTUDIER LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DES SOLS ?

La qualité biologique d'un sol dépend de la diversité et de l'abondance des différents organismes qui le composent. Du plus grand au plus petit, ces organismes contribuent à des fonctions primordiales : production de biomasse, recyclage de la matière, stockage de carbone, régulation d'espèces ravageuses, filtration de l'eau, etc. Les sols et leur biodiversité se situent ainsi au cœur des grands enjeux environnementaux actuels comme la sécurité alimentaire ou la lutte contre le changement climatique. En dépit de leur rôle essentiel, les sols subissent de multiples pressions d'origines diverses : pollutions industrielles, développement urbain, pratiques agricoles intensives, changements climatiques... Les organismes du sol en sont les premières victimes. Et dès lors que la biodiversité s'érode, les sols perdent leur capacité à remplir certaines de leurs fonctions. Qu'en est-il de la vie des sols qui nous entourent, dans nos parcs et jardins, à la campagne comme à la ville ? Suivre et documenter l'évolution de l'état biologique des sols dans ces espaces, tel est l'enjeu de QUBS. Issu du projet de recherche Biodiversité des sols urbains et service écosystémique (ANR BISES, pilotage université Paul-Valéry Montpellier 3 et INRAE), cet observatoire a bénéficié de l'expérience d'un premier outil participatif sur les invertébrés du sol, *Jardibiodiv*, porté par l'université de Lorraine et INRAE. Pour répondre à l'enjeu d'un suivi national et massif, tous les partenaires de QUBS ont décidé de mettre en commun leurs expertises et leurs réseaux respectifs déployés dans le cadre de sciences participatives. Ainsi, les données récoltées par les participantes et participants permettront une meilleure évaluation et compréhension des déterminants de la qualité biologique de ces sols, à de larges échelles spatiales et temporelles.

Quelques représentants de la faune du sol, de gauche à droite : un cloporte (*Porcellio spinicornis*), le grand calosome (*Calosoma sycophanta*), un coléoptère myrmécophile (*Dichillus* sp), une fourmi granivore (*Messor capitatus*) attaquée par une araignée (*Euryopsis episinoides*).



PARTICIPER EN DÉCOUVRANT LA FAUNE DU SOL

Deux protocoles de suivi de la faune du sol sont proposés aux participants : « Aspifaune » pour en caractériser l'activité diurne et « Noctambules » l'activité nocturne. Ils permettront dans un premier temps de collecter des données sur la faune de surface. Afin de suivre différents aspects de la qualité biologique des sols, d'autres protocoles viendront compléter le programme. Au menu : mesurer l'abondance des vers de terre et des escargots, par exemple, ou encore évaluer le potentiel de dégradation de la matière organique des sols.

Quelques représentants de la faune du sol, de gauche à droite : un cloporte (*Porcellio spinicornis*), le grand calosome (*Calosoma sycophanta*), un coléoptère myrmécophile (*Dichillus* sp), une fourmi granivore (*Messor capitatus*) attaquée par une araignée (*Euryopsis episinoides*).

« Aspifaune » et « Noctambules » reposent sur la collecte de spécimens vivants à photographier et identifier. Un des objectifs du programme étant d'améliorer les connaissances du grand public sur cette faune, une attention particulière a été portée pour en faciliter la reconnaissance : c'est ainsi que la toute première clé de détermination intégrant plus de 400 espèces ou groupes d'espèces de la faune du sol a été spécialement conçue pour accompagner les observateurs et observatrices dans leur découverte.

VALORISATION

- > Communiqué de presse : <https://www.inrae.fr/actualites/qubs-nouveau-programme-suivi-qualite-biologique-sols>
- > Programme qubs.fr
- > Tous les programmes de sciences participatives de Vigie-nature vigienature.fr
- > Qubs est aussi sur particitaie.upmc.fr et Jardibiodiv

Ce programme a été financé par l'Agence nationale de la recherche (projet ANR BISES Biodiversité des sols urbains et services écosystémiques) et par le projet Territoire d'Innovation «Dijon Alimentation Durable 2030».



Contact : Apolline Auclerc

Unité : LSE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Grand Est-Nancy

Mots clés : Approche participative, étude des sols, biodiversité



12^{ème} édition - Symposium international sur l'écologie des vers de terre

Organisé tous les quatre ans depuis 1978 à l'échelle mondiale, le symposium ISEE (International Symposium on Earthworm Ecology) réunit les chercheurs en écologie lombricienne (vers de terre). La douzième édition s'est déroulée du 10 au 15 juillet 2022, à Rennes. Dans un contexte de transitions (climatiques, écologiques, agronomiques) et au regard des attentes de la société, les grands enjeux adressés par la communauté scientifique ont été de : faire l'état de l'art des connaissances récentes permettant d'identifier les facteurs environnementaux et anthropiques influençant à différentes échelles les lombriciens, leur structuration spatiale et leur dynamique, les conséquences sur les fonctions du sol (cycle des éléments C, N, P ; structuration des sol ; détoxification) et les services écosystémiques associés (régulation hydrique, climatique et des pathogènes ; services d'approvisionnement...); favoriser le transfert des connaissances et des biotechnologies associées aux lombriciens. Ce symposium a rencontré un vrai succès : réalisé en hybride, il a accueilli 171 personnes (chercheurs, enseignants-chercheurs et doctorants) dont 135 en présentiel. Les participants venaient de 36 pays dont 14 pays extra-européens. La qualité scientifique des communications a été soulignée (68 oraux, 3 tables rondes, 103 posters). Les communications seront mises en ligne et une édition spéciale « Earthworm ecology » sera publiée dans European Journal of Soil Biology.

CONTEXTE ET ENJEUX

Le symposium international sur l'écologie lombricienne (ISEE12) a lieu tous les 4 ans à l'échelle mondiale. Après s'être déroulée ces 12 dernières années sur les continents américain et asiatique, la douzième édition a eu lieu à Rennes, du 10 au 15 juillet 2022. La candidature de la France avait été retenue grâce à trois points forts mis en exergue lors de l'édition précédente :

- Être organisée par un consortium national de 11 experts français issus de différentes structures de recherche et d'enseignement supérieur de référence (INRAE de Rennes, Montpellier, Avignon ; CNRS ; IRD ; Institut Agro Rennes-Angers, Dijon ; Université Rennes 1). Cela permettait d'assurer i) une expertise sur les principaux axes développés lors du symposium, depuis la diversité génétique jusqu'aux rôles des lombriciens dans le fonctionnement et la préservation des écosystèmes et des services écosystémiques associés, en passant par l'effet des activités humaines (agricoles, industrielles, ..) et du changement climatique sur la dynamique des communautés et sur la conservation ou l'érosion de la biodiversité, et ii) une prise en compte de la variabilité des réponses au regard de la diversité de contextes pédo-climatiques et agro-environnementaux.
- Être un lieu de rencontre et d'échange entre les chercheurs et les acteurs de terrain (acteurs du monde agricole et des entreprises, décideurs politiques)
- Favoriser les liens entre les différents pays à l'échelle mondiale pour faire émerger et diffuser des solutions face aux changements globaux.



Participants à la 12^{ème} Edition du Colloque International sur l'Écologie Lombricienne

RÉSULTATS

Le symposium a accueilli 171 chercheurs, enseignants-chercheurs et doctorants (135 en présentiel, 36 en distanciel). Ces personnes venaient de 36 pays du monde entier, la France représentant 38%, la Chine 7%, l'Allemagne 4%, le Royaume Uni 11%, les Pays-Bas 6%. Les retours ont souligné la grande qualité scientifique des interventions [68 communications au total : 4 communications invitées (3

françaises), 5 key-notes invitées (1 française), 59 communications classiques (16 françaises dont 10 INRAE) et 103 posters (43 français dont 23 INRAE)] et des échanges pendant les 3 tables rondes impliquant notamment agriculteurs et conseillers agricoles.

De nombreuses présentations ont éclairé sur le rôle des lombriciens dans le fonctionnement du sol et les services écosystémiques associés, notamment leur rôle comme catalyseurs dans la dynamique des nutriments (N, P) les positionnant comme acteurs clés dans les transitions agroécologiques. Les avancées les plus récentes ont été présentées sur la contribution des vers de terre à la diminution ou augmentation des émissions de gaz à effet de serre, soulignant l'effet majeur de leurs biostructures et les réponses conditionnées par les contextes pédo-climatiques. Ce symposium a mis en avant les points forts des travaux menés par les équipes françaises : i) l'application d'outils moléculaires et de nouvelles techniques d'analyse des données permettant une meilleure compréhension des processus et de la dynamique de spéciation des vers de terre, ii) la caractérisation des biostructures et fonctions associées permettant notamment d'affiner la classification des lombriciens, iii) la réponse des lombriciens aux pratiques agroécologiques ou à des contraintes liées aux nanoplastiques, iv) l'intérêt des recherches participatives permettant d'augmenter de manière importante les jeux de données et aboutissant à la production de valeurs de référence.



© G. Pérès, Institut Agro



Visite du Mt Saint-Michel lors du symposium © G. Pérès, Institut Agro

PERSPECTIVES

Les communications orales ont été enregistrées et seront mises à disposition des participants et dans un second temps des non-participants.

La traduction en français de certaines communications est planifiée afin de rendre accessibles ces connaissances au plus grand nombre.

VALORISATION

> Site du symposium : <https://isee12.symposium.inrae.fr/>

- > Les résumés (communications orales, posters), ainsi que les posters (pdf) ont été regroupés dans un e.book, distribué lors du symposium.
- > Une édition spéciale « Earthworm ecology » sera publiée dans European Journal of Soil Biology.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Relais médiatiques :

- > Chaîne locale de TV Rennes
- > Ouest-France (<https://www.ouest-france.fr/bretagne/les-vers-de-terre-gluants-mais-precieux-allies-de-la-transition-agricole-et-du-climat-eff56df2-01ba-11ed-8f16-ba6df499c943>)
- > Site de destination-Rennes <https://www.centre-congres-rennes.fr/fr/pourquoi-rennes/magazine/choisir-le-couvent/colloque-lombriciens/>



Contact : Guénola PERES

Unité : UMR SAS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bretagne-Normandie

Mots clés : Evolution et biodiversité lombricienne, écotoxicologie, réseaux trophiques, fonctionnement du sol et préservation des ressources sol et eau, agriculture durable-agroécologie, changement climatique, ingénierie écologique, recherche participative



Développement de l'ingénierie pédo-faunistique pour la réhabilitation des sols dégradés - approche par les traits fonctionnels des invertébrés du sol

Dans un contexte de restauration des milieux dégradés par les activités humaines, l'approche par les traits fonctionnels des plantes est souvent utilisée pour tenter de rétablir des niveaux de fonctions et services rendus (e.g. capacité à fixer l'azote de l'air). Au vu de la biodiversité fonctionnelle des sols, il pourrait être envisageable de considérer les traits fonctionnels des invertébrés du sol (e.g. taille du corps, capacité à creuser des galeries) dans la refunctionalisation des sols dégradés. C'est cette approche innovante qui a été abordée par des écologues du sol lors d'un atelier au cours des VII journées nationales TEBIS « Traits Écologiques et Biologiques des organismes des Sols » en 2018. Un position paper a ainsi été co-écrit et accepté dans la Special Issue virtuelle 'Soil invertebrate traits' de la revue Geoderma en 2022, rassemblant 11 chercheurs de 8 unités de recherche françaises. Le but de cette publication est de lister des traits d'intérêts liés à 4 grandes fonctions souvent prises en compte dans les projets d'ingénierie écologique : les cycles biogéochimiques des nutriments et du carbone, le devenir des contaminants, l'amélioration de la structure du sol et la régulation biologique des bioagresseurs par les relations prédateurs/proies. Ce papier propose également des lignes directrices afin d'intégrer au mieux les traits des invertébrés du sol dans les projets de restauration écologique. Finalement, est souligné le manque cruel d'expérimentations sur ce sujet, qui entrave le développement rigoureux de cette approche dans un cadre appliqué.

CONTEXTE ET ENJEUX

Lors des journées annuelles TEBIS « Traits Écologiques et Biologiques des organismes des Sols » qui rassemblent des experts nationaux sur les organismes du sol dans un but de partager l'avancée des recherches, de lancer des projets collectifs ou encore d'aider à l'intégration des jeunes scientifiques, un atelier de réflexion concernant l'approche innovante de l'utilisation des traits fonctionnels des invertébrés du sol en ingénierie écologique a été mis en place en 2018.

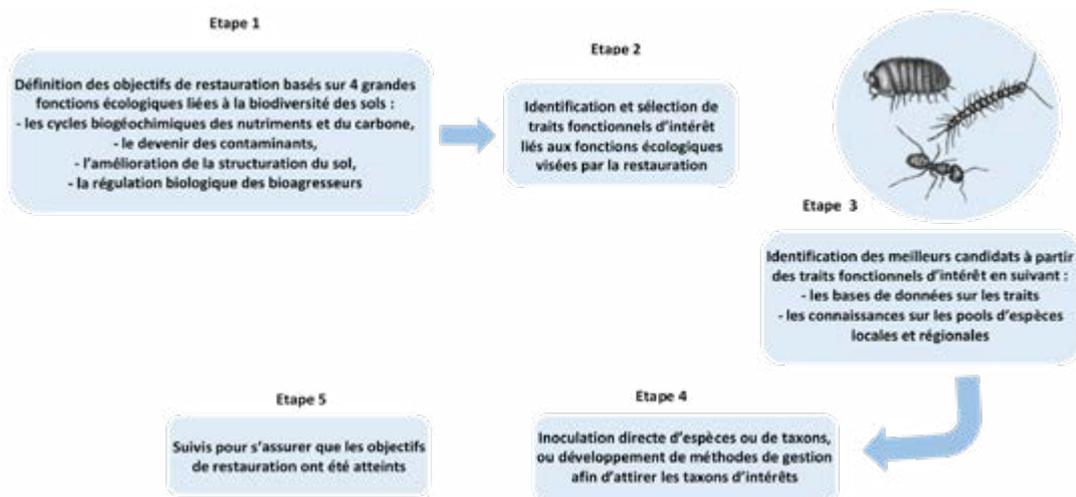
En adaptant la définition à partir de celle donnée pour les plantes, un trait fonctionnel pour les invertébrés du sol est une caractéristique morphologique, physiologique, phénologique ou comportementale mesurable à l'échelle de l'individu, de la cellule à l'organisme entier, sans qu'il y ait référence à l'environnement ou tout autre niveau d'organisation (Pey et al., 2014).

Les traits fonctionnels des plantes sont souvent utilisés dans un but de refunctionalisation de sites dégradés. Du fait du nombre important de services écosystémiques rendus par les invertébrés du sol (FAO et al., 2020), il paraissait intéressant de prendre en compte les traits de ces animaux dans les scénarios de restauration écologique. De plus, l'inoculation ou l'attraction d'organismes d'intérêt en suivant une approche "trait" apparaît comme plus robuste qu'une approche par espèces, car elle permet d'éviter des scénarios site ou contexte dépendants et donc non généralisables (Carlucci et al., 2020).

Ainsi, dans un contexte de sites dégradés par les activités humaines, nous proposons des traits d'intérêts en lien avec 4 grandes fonctions écologiques cruciales en restauration écologique, et dans lesquelles les invertébrés des sols sont impliqués : (i) cycle des nutriments, cycle et stockage du carbone, (ii) transformation des contaminants, (iii) structuration du sol et (iv) régulation biologique des bioagresseurs par les relations prédateurs/proies.

RÉSULTATS

Cet article propose pour la première fois une démarche de prise en compte des traits fonctionnels des invertébrés des sols dans un objectif de restauration de sites dégradés (cf. figure) et présente une liste de traits d'intérêts. Dans ce position paper nous citons également



Du fondamental à l'appliqué : proposition d'étapes à suivre pour l'intégration des traits fonctionnels des invertébrés du sol en ingénierie écologique

les principales lacunes et limitations des connaissances qui entravent actuellement l'utilisation de cette méthode en ingénierie écologique. Sont présentés en particulier (i) le fait que peu d'études utilisent les invertébrés du sol dans un objectif de restauration, et encore moins d'études fondées sur les traits (ii) le manque de données avérées sur le rôle des invertébrés du sol dans les écosystèmes, (iii) le manque de données sur les attributs de traits et sur des groupes spécifiques dans les bases de données existantes, et (iv) les relations complexes entre les fonctions et les traits des organismes qui nécessitent encore d'être étudiées.

PERSPECTIVES

Des études in situ sont nécessaires en ingénierie écologique afin de démontrer les avantages des approches fondées sur les traits par rapport aux approches basées sur les espèces emblématiques, telles que des espèces de vers de terre ou de fourmis.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Carlucci, M.B., Brancalion, P.H.S., Rodrigues, R.R., Loyola, R., Cianciaruso, M.V., 2020. Functional traits and ecosystem services in ecological restoration. *Restor. Ecol.* 28, 1372–1383. <https://doi.org/10.1111/rec.13279>
- > FAO, ITPS, GSBI, SCBD, EC., 2020. State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. [10.4060/cb1928en](https://doi.org/10.4060/cb1928en)



Contact : Apolline Auclerc

Unité : UMR LSE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Grand-Est Nancy

Métaprogramme : BIOSEFAIR

Mots clés : Ingénierie écologique ; restauration écologique ; biodiversité des sols



Open data : un jeu de données unique sur l'état des sols de France issu du RMQS

Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) est un programme national d'évaluation et de suivi à long terme de la qualité des sols français. Ce réseau, développé dans le cadre du GIS Sol repose sur le suivi de 2240 sites représentatifs des sols français et de leur occupation, répartis sur l'ensemble du territoire français (métropole et outre-mer) selon une grille systématique de 16 km de côté. Des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols sont mesurées sur chaque site, par campagne (tous les 10 à 12 ans). Après une étude juridique du statut des données et des auteurs, un premier jeu de données issu du RMQS a été diffusé sur le portail des données ouvertes INRAE fin 2021. Il comprend les résultats d'analyses issus de 2171 sites de métropole et leurs caractéristiques. Les analyses couvrent les paramètres physico-chimiques courants (granulométrie, carbone, azote, CEC, etc.) et les teneurs de 12 éléments traces métalliques. La publication de ce jeu de données est une étape importante dans la diffusion des données du RMQS qui était très attendue. Depuis sa publication, il a été consulté plus de 1800 fois et les fichiers associés totalisent en novembre 2022 plus de 620 téléchargements. Ce jeu de données constitue, pour beaucoup d'utilisateurs, des valeurs de référence de la qualité des sols en France et peut être utilisé pour l'alimentation de divers modèles, de transfert sol-plante de contaminants ou d'atténuation du changement climatique, par exemple.

CONTEXTE ET ENJEUX

Le Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) est un programme national d'évaluation et de suivi à long terme de la qualité des sols français. Ce réseau repose sur le suivi de 2240 sites représentatifs des sols français et de leur occupation, répartis sur l'ensemble du territoire français (métropole et outre-mer) selon une grille systématique de 16 km de côté. Il répond aux enjeux liés à la pollution des sols, à la biodiversité des sols et, plus généralement à l'évolution de la qualité des sols.

RÉSULTATS

La première campagne de prélèvement en métropole s'est déroulée de 2000 à 2009. Cette campagne, axée sur la caractérisation des sols et notamment leur contamination, a permis de cartographier les principaux paramètres pédologiques (28 variables) ainsi que les teneurs en 12 éléments traces métalliques (ETM) par extraction totale ou partielle et 70 polluants organiques persistants.

La diffusion des données de la première campagne du RMQS correspond à une attente forte des chercheurs et des décideurs publics. Si les résultats de la première campagne ont été largement valorisés au sein de la communauté scientifique et notamment INRAE (e.g. Saby et al., 2009, Carne et al., 2021, Martin et al., 2022), l'ouverture et la diffusion publique était encore limitée pour des raisons essentiellement d'ordre juridique. Les données sont ainsi diffusées avec des coordonnées théoriques et non les coordonnées réelles pour être en conformité avec



Montage : Christine Le Bas, photo de profil © Claudy Jolivet, photo laboratoires © Sacha Desbourdes, INRAE InfoSol

le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD). Ce premier jeu de données issu de la première campagne du RMQS a été mis en diffusion sur le portail des données ouvertes d'INRAE fin 2021, permettant ainsi d'ouvrir plus largement au public l'accès à ces données. Il comprend les résultats d'analyses issus de 2171 sites de métropole, répartis sur 2146 cellules, pour les analyses physico-chimiques courantes (granulométrie, carbone, azote, CEC, etc.) et celles sur les ETM. Depuis sa publication, il a été consulté plus de 1800 fois et les fichiers associés totalisent en novembre 2022 plus de 620 téléchargements.

PERSPECTIVES

Ce premier jeu de données n'est que la première étape de la diffusion en données ouvertes des résultats de la première campagne du RMQS. D'autres résultats d'analyse sont encore à diffuser comme les masses volumiques, les données spectrales infrarouge, les analyses de stabilité de la matière organique ou encore les données sur les polluants organiques persistants. Par ailleurs, les informations liées à la gestion des sites où les sols ont été échantillonnés, également collectées dans le cadre du RMQS, font également l'objet d'une étude pour évaluer la possibilité de leur diffusion. Le jeu de données et les métadonnées associées ont été également traduits en anglais, ce qui devrait accroître son périmètre de diffusion ou sa visibilité dans la communauté anglophone.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Jeu de données <https://doi.org/10.15454/QSXKGA>
- > www.gissol.fr
- > Martin, Manuel P., Arrouays, Dominique, Barré, Pierre, Boulonne, Line, Cecillon, Lauric, Chen Songchao, Chenu Claire, Eglin Thomas, Guenet Bertrand, Meersmans Jeroen, Mulder Vera Leatitia, Saby Nicolas P.A.. 2022. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols pour l'étude du carbone organique des sols en France métropolitaine. *Avancées scientifiques et applications. Etude et Gestion des Sols*, 29, pp.327-349. <https://hal.inrae.fr/hal-03796732>
- > Carne Géraldine, Leconte Stéphane, Sirot Véronique, Breyse Nicolas, Badot Pierre-Marie, Bispo Antonio, Déportes Isabelle, Dumat Camille, Rivières Gilles, Crepet Anne. 2021. Mass balance approach to assess the impact of cadmium decrease in mineral phosphate fertilizers on health risk: The case-study of French agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 2021, 760, pp.143374. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143374>



Contacts : Line Boulonne, Christine Le Bas, Antonio Bispo

Unité : UR Infosol

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Val de Loire

Mots clés : Sols, qualité du sol, surveillance, données



© Claire Chenu

Le programme de recherches européen EJP SOIL « Vers une gestion climato-intelligente et durable des sols agricoles »

Les sols agricoles se trouvent à la croisée d'enjeux multiples : maintien d'une production agricole durable, adaptation au et atténuation du changement climatique, préservation de la biodiversité et de la qualité de l'environnement. Pourtant leur dégradation s'accroît. La commission européenne et 24 états européens se sont associés pour financer un programme de recherches de cinq ans, qui a débuté en février 2020, l'European Joint Programme SOIL. Il associe 26 partenaires et 19 tierces parties. Ce programme mène des activités de développement des connaissances via des projets de recherche qu'il finance, de partage et transfert des connaissances en particulier par des interactions avec des porteurs d'enjeux dans chaque pays et des actions de formation. Il développe des activités d'harmonisation, organisation et stockage de la connaissance et des données sol et d'application des connaissances en particulier dans l'appui aux politiques publiques.

CONTEXTE ET ENJEUX

Le contexte est contrasté en ce qui concerne les sols et la recherche sur les sols en Europe. Plus de 60% des sols européens seraient dégradés selon le centre de recherches de la commission et l'évaluation de leur qualité ou « santé » fait débat en l'absence de consensus sur les concepts, les méthodes d'évaluation, les indicateurs et les valeurs de référence. L'information sur les sols apparaît relativement riche en Europe, mais très hétérogène selon les pays et ni harmonisée, ni partagée. Par ailleurs, la sensibilisation aux sols a beaucoup progressé et les sols commencent à être considérés dans les débats environnementaux. Les politiques publiques européennes s'en sont récemment emparés, au travers d'une mission sur les sols (A soil deal for Europe, Avril 2020), d'une nouvelle stratégie européenne sur les sols (Nov.

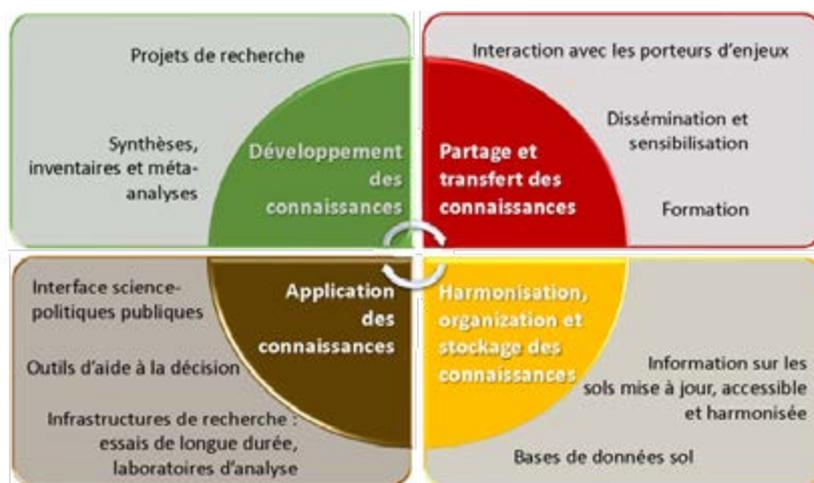
2021) et d'un projet de loi sur la santé des sols, en cours d'élaboration. Un effort de recherche finalisée est donc nécessaire, particulièrement sur les sols agricoles.



RÉSULTATS

L'EJP SOIL est maintenant à mi-parcours. Une feuille de route a été construite collectivement, basée sur la consultation de parties prenantes et de scientifiques dans chacun des pays participants qui a permis d'établir une suite cohérente d'états des lieux. Des priorités de recherche en ont émergé, qui ont servi de base à des appels d'offres internes au consortium. Vingt-six projets de recherche ont été financés et sont en cours, pour un budget global de 45 M€. INRAE et ses tierces parties en coordonnent quatre et participent à la plupart d'entre eux. Par ailleurs, l'EJP SOIL a convaincu des agences de recherche de différents pays de financer des projets s'inscrivant dans la feuille de route de l'EJP SOIL, via des appels d'offres « externes » qu'il organise.

En ce qui concerne l'information sur les sols, des inventaires des bases de données nationales, des réglementations relatives à l'accès aux données sol dans les différents pays et une analyse comparée des réseaux nationaux de mesure de la qualité des sols ont été réalisés. Ils servent de base à l'activité de l'observatoire européen des sols récemment créé par la commission européenne.



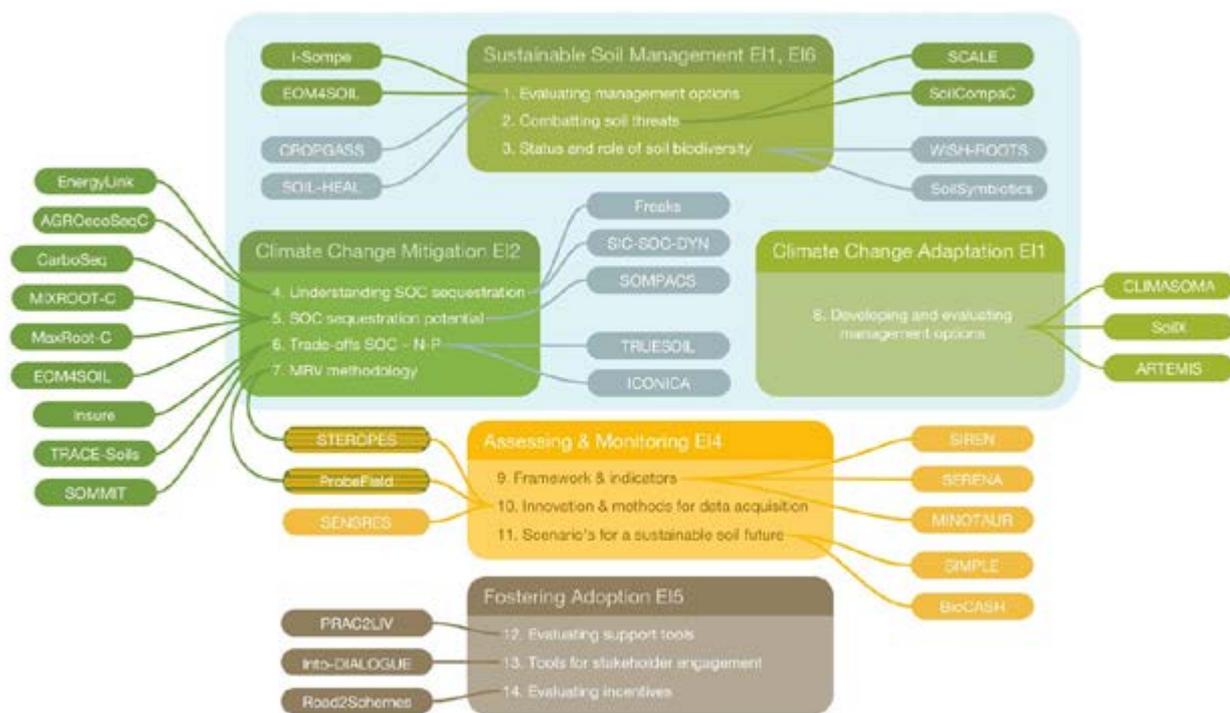
Les activités de l'EJP SOIL

PERSPECTIVES

Les deux années à venir du programme devraient apporter une riche et pertinente moisson de résultats de recherche. Au-delà, le programme EJP SOIL continuera à contribuer fortement à la construction de l'espace Européen de la recherche sur les sols, au sein de la Mission A Soil Deal for Europe.

VALORISATION

- > 36 publications scientifiques dans des revues à comité de lecture : <https://ejpsoil.eu/knowledge-sharing-platform/scientific-publications>
- > Des webinaires ouverts à tous et accessibles : <https://ejpsoil.eu/knowledge-sharing-platform/webinar-recording-and-slides>
- > Une base de données de métadonnées de 218 essais de longue durée hébergée par le programme Bonares : <https://www.bonares.de/datacentre/research-data>
- > Les travaux de l'EJP SOIL ont alimenté une réponse au « call for evidence » de la commission européenne, élément de préparation d'une future loi sur la santé des sols
- > Les résultats et recommandations de l'EJP SOIL sont intégrés aux documents de travail préparatoires à la future loi sur la santé des sols
- > Pour les unités du département, ce programme offre des partenariats pour des réponses aux appels à projet d'Horizon Europe (Mission : A soil deal for Europe) comme les projets PrepSoil et Benchmarks qui démarrent.



Les projets de recherche de l'EJP SOIL
 Sur fond coloré : projets "internes"; en gris projets en réponse au premier appel d'offres international

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Bellassen, V., Angers, D., Kowalczewski, T., Olesen, A., 2022. Soil carbon is the blind spot of European national GHG inventories. Nature Climate Change.
- > Donmez, C., Blanchy, G., Svoboda, N., D'Hose, T., Hoffmann, C., Hierold, W., Klumpp, K., 2022. Provision of metadata of European agricultural long-term experiments through BonaRes and EJP SOIL collaboration. Data in Brief 42.
- > Evans, D.L., Janes-Bassett, V., Borrelli, P., Chenu, C., Ferreira, C.S.S., Griffiths, R.I., Kalantari, Z., Keesstra, S., Lal, R., Panagos, P., Robinson, D.A., Seifollahi-Aghmiuni, S., Smith, P., Steenhuis, T.S., Thomas, A., Visser, S.M., 2021. Sustainable futures over the next decade are rooted in soil science. Eur. J. Soil Sci.
- > Vaudour, E., Gholizadeh, A., Castaldi, F., Saberioon, M., Boruvka, L., Urbina-Salazar, D., Fouad, Y., Arrouays, D., Richer-de-Forges, A.C., Biney, J., Wetterlind, J., Van Wesemael, B., 2022. Satellite Imagery to Map Topsoil Organic Carbon Content over Cultivated Areas: An Overview. Remote Sensing 14(12).



Contacts : Claire Chenu, Pierre Benoit, Sophie Cornu

Unité : UMR ECOSYS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Île-de-France - Versailles-Saclay

Mots clés : Sol, Europe, partenariat, changement climatique



Vers une meilleure connaissance des stocks de carbone et d'eau : une nouvelle méthode de mesure de la densité adaptée à tout type de sol

La densité apparente des sols, est une mesure de premier ordre en science du sol. Elle est nécessaire notamment aux calculs de stocks, en particulier les stocks de carbone qui constituent un enjeu majeur aujourd'hui, aux bilans de masse tels que le bilan hydrique par exemple, et à la paramétrisation de modèles de transferts. Mais c'est une propriété difficile à mesurer et les méthodes existantes ne sont pas généralisables, notamment aux sols caillouteux et aux sols très organiques de tourbière. Ce travail propose une nouvelle méthode rapide de mesure in-situ de la densité apparente du sol basée sur la mesure du volume d'excavation par photogrammétrie. La comparaison avec des méthodes standardisées montre une bonne précision de la mesure et une applicabilité à tout type de sol, en particulier pour les sols caillouteux. En complément, différentes gammes de volumes peuvent être étudiées en fonction des différentes porosités à caractériser, en surface du sol ou en profondeur pour chaque horizon de sol. La méthode est aujourd'hui appliquée par d'autres équipes de recherche et, suite au retour d'expérience, un protocole est en cours de consolidation, en vue d'une normalisation.

CONTEXTE ET ENJEUX

La densité apparente des sols, mesure de premier ordre en science du sol, est nécessaire notamment aux calculs de stocks, au bilan de masse, et à la paramétrisation de modèles de transferts. Mais c'est une propriété difficile à mesurer. De nombreux auteurs ont proposé des méthodes de mesures très diversifiées. Elles sont toutes fastidieuses à mettre en œuvre et sujettes à des biais variables en fonction des types de sols, en particulier pour les sols présentant des taux d'éléments grossiers importants ou des sols de tourbière, très riches en matières organiques. Au fil du temps, pour les sols où elle est applicable, la méthode dite « au cylindre » s'est imposée comme méthode standard. Pour les autres sols, les méthodes basées sur une excavation de terre dont on mesure le volume in-situ sont très courantes, avec de nombreuses variantes adaptées au cas par cas. En revanche, elles ne sont pas applicables sur la face des profils pédologiques. Les développements récents de la photogrammétrie permettent aujourd'hui de disposer à la fois de techniques performantes de prises de vue sur le terrain et de traitement d'image. Ces méthodes permettent d'avoir une mesure de volume très peu biaisée. L'objectif de ce travail a été d'adapter et de tester cette application à la mesure de la densité apparente in situ, dans l'idée d'obtenir une nouvelle méthode fiable, généralisable à tout type de sols.

RÉSULTATS

Le volume de sol en place est obtenu par différence de deux surfaces 3D (avant et après excavation) obtenues par deux prises de vue photogrammétriques successives. Le calage de ces deux surfaces 3D est garanti par la mise en œuvre de la méthode Time-SIFT (Feurer and Vinatier, 2018) utilisable pour tout type de suivi 3D par photogrammétrie. La méthode d'estimation de densité apparente par photogrammétrie a été testée et validée dans différents contextes pédologiques choisis pour exprimer le maximum de variabilité (taux d'éléments grossiers, matière organique, taux d'argile granulométrique). L'estimation des volumes de sols en place et, in fine, de leur densité est fiable comparativement aux autres méthodes de référence.

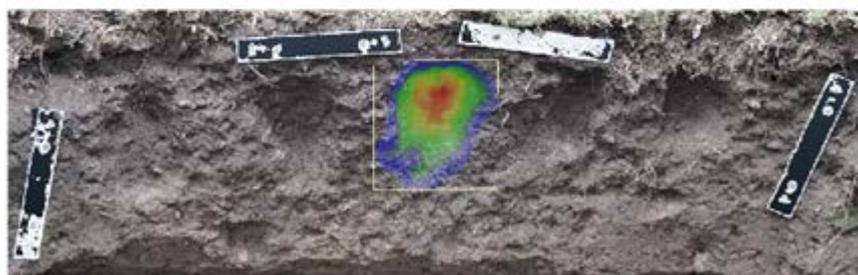
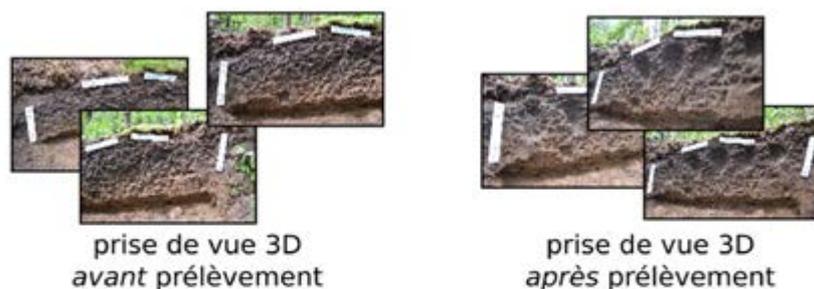
PERSPECTIVE

La méthode par photogrammétrie semble très prometteuse sur plusieurs aspects. D'une part, la précision de la mesure du volume dans des conditions très variées de type de sol permet de généraliser cette technique. D'autre part, la possibilité de moduler le volume analysé en fonction de la porosité que l'on souhaite caractériser est un avantage important. Enfin, le fait de pouvoir facilement étudier des horizons directement sur la face d'observation des profils est une avancée importante pour l'étude des horizons particuliers.

Valorisation

La publication de ce travail de recherche et du code R pour la détection et le calcul automatisé du volume des échantillons permettent aujourd'hui une dissémination dans plusieurs laboratoires par plusieurs équipes (ex :. Siegwart et al. 2022). Les retours d'expérience permettent d'améliorer le protocole existant et le consolider en vue d'une éventuelle normalisation. Cette méthode généralisable à tout type de sol a vocation à devenir une nouvelle méthode de référence pour l'estimation de la densité apparente. En effet, elle ouvre à une meilleure connaissance des stocks de carbone et d'eau à travers une précision accrue et un potentiel d'application plus large.

Principe de mesure de la densité apparente par photogrammétrie



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Guillaume Coulouma, Denis Feurer, Fabrice Vinatier, Olivier Huttel. Assessing new sensor-based volume measurement methods for high-throughput bulk density estimation in the field under various soil conditions. *European Journal of Soil Science*, Wiley, 2021.
- > Denis Feurer, and Fabrice Vinatier. «Joining multi-epoch archival aerial images in a single SfM block allows 3-D change detection with almost exclusively image information.» *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 146:495-506, 2018.
- > Vinatier, F., Développement du code R pour la détection et le calcul automatisé du volume des échantillons à partir des nuages de points 3D avant et après excavation (<https://doi.org/10.5281/zenodo.4036423>)
- > Siegwart, L., Jourdan, C., Piton, G. et al. Root distribution and properties of a young alley-cropping system: effects on soil carbon storage and microbial activity. *Plant Soil*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05714-9>



Contact : Guillaume Coulouma

Unité : UMR LISAH

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : Densité apparente, sol caillouteux, photogrammétrie



Un modèle agrohydrologique pour estimer les impacts hydrologiques et agricoles des retenues d'eau

Le stockage d'eau dans des retenues comme solution d'adaptation de l'agriculture au changement climatique et aux sécheresses est l'objet de profondes controverses. Celles-ci sont nourries en partie par le déficit de connaissances et de méthodes capables de comprendre et de quantifier les causes et l'intensité des impacts cumulés environnementaux, notamment hydrologiques, des retenues ainsi que leur intérêt afin de sécuriser les rendements des cultures. Pour pallier à ce déficit, un modèle agro-hydrologique, Mhydas-small-reservoirs, a été développé. Les premières applications du modèle sur un bassin versant démontrent son intérêt pour comprendre et quantifier les impacts locaux et cumulés des retenues sur le régime hydrologique des rivières le long du réseau hydrographique ainsi que sur le rendement des cultures dans chaque parcelle. Ce modèle constitue également un outil de d'exploration de scénarios envisageables sur un territoire en matière de densité de retenues et de modes de gestion de l'eau stockée dans les retenues.

CONTEXTE ET ENJEUX

Parmi les solutions d'adaptation aux sécheresses, « le stockage de l'eau (NDLR sous forme de retenues) est la solution qui interroge le plus comme levier potentiel majeur de la sécurisation de la ressource en eau », comme le reconnaît la synthèse des présidents des groupes de travail du Varenne de l'eau et de l'agriculture (Decrozaille et al., 2022). Les retenues d'eau sont en effet à l'origine de profondes controverses nourries en partie par le déficit de connaissances et de méthodes capables de comprendre et de quantifier les causes et l'intensité des impacts cumulés environnementaux, notamment hydrologiques, des retenues ainsi que leur intérêt afin de sécuriser les rendements des cultures.

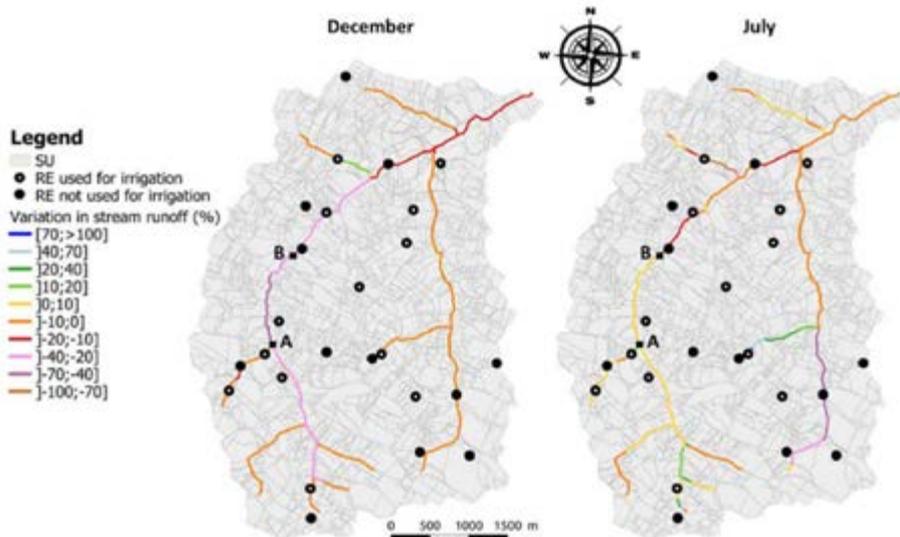
RÉSULTATS

C'est pour pallier ce manque de méthodes et de connaissances qu'un modèle agrohydrologique de bassin versant, nommé Mhydas-small-reservoirs, a été conçu et développé sous la plateforme OpenFLUID. L'objectif de Mhydas-small-reservoirs, et ce qui en fait son originalité, est de simuler les impacts locaux et cumulés des retenues sur le régime hydrologique le long du réseau hydrographique ainsi que sur le rendement des cultures au niveau de chaque parcelle. Pour ce faire, Mhydas-small-reservoirs couple des modèles représentant l'hydrologie du bassin versant, les cultures, les pratiques agricoles, dont les pratiques d'irrigation, et les retenues. Mhydas-small-reservoirs s'appuie sur une représentation spatialement explicite des objets du bassin versant : parcelle, bief de rivière, aquifère, etc... Ce mode de représentation est la propriété consubstantielle des modèles de la famille Mhydas conçus par le LISAH depuis 2002 (Mhydas, 2002 ; GeoMhydas, 2010 ; Mhydas-pesticides, 2011 ; Mhydas-Erosion 2012 ; Groovscape, 2022).

Fruit d'un projet soutenu par l'OFB, INRAE et la Région Occitanie, Mhydas-small-reservoirs a été testé et validé sur un bassin versant dans le Gers caractérisé par une densité de retenues de 1,3 retenues/km². La simulation du rendement des cultures (maïs et autres céréales, soja, tournesol) et du débit de rivière pour des scénarios simples d'occupation du sol et d'usage des retenues démontrent l'intérêt/l'utilité d'une telle approche couplée et distribuée.

PERSPECTIVES

La principale perspective de ce travail est d'utiliser Mhydas-small-reservoirs pour mieux comprendre les relations de cause à effet entre d'un côté les propriétés des réseaux de retenues et les modes de gestion de l'eau dans les retenues (volume et saisonnalité des prélèvements), et de l'autre les impacts des retenues sur les cultures et l'hydrologie des bassins versants. A cet effet, l'application de Mhydas-small-reservoirs à plusieurs bassins versants couvrant une large gamme de contexte agropédoclimatique serait bénéfique et source d'enseignements. Ces



Variation relative (%) du débit mensuel pour Décembre 2014 et Janvier 2015 le long du réseau hydrographique d'un bassin versant. La variation est celle simulée entre une situation correspondant à l'état actuel du bassin (où 13 sur 25 retenues sont utilisées pour l'agriculture) et une situation où l'ensemble des retenues serait exploité pour irriguer les cultures. L'intensité et le sens de la variation sont donnés par une couleur indiquée dans la légende.

relations de cause à effet devront considérer différents scénarios d'évolution du bassin versant, que ce soient des évolutions climatiques en lien avec le changement climatique et des évolutions des assolements et des systèmes de culture.

VALORISATION

Le modèle a donné lieu à une publication dans *Environmental Software and Modelling*. Une déclaration d'invention est en cours d'établissement. Les conclusions récentes du programme Impact Cumulé des Retenues Agricoles (ICRA) initié et conduit actuellement par l'OFB montrent un besoin des bureaux d'étude de disposer d'outils de simulation de l'impact hydrologique des retenues dans des bassins versants de quelques dizaines de km². La valorisation du modèle sous la forme du transfert de ses concepts ou de ses modules vers un bureau d'étude pourrait être envisagée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Decrozaille et al., 2022, Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique, Synthèse des Présidents, 25p
- > Lebon, N., Dagès, C., Leenhardt, D., Molénat, J. 2022, A new agro-hydrological catchment model to assess the cumulative impact of small reservoirs, *Env. Mod. & Soft.*, 153, 105409, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105409>



Contacts : Jérôme Molénat, Cécile Dagès, Delphine Leenhardt

Unité : UMR LISAH

Départements : AQUA / AgroEcoSystem / ACT

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : Retenues d'eau, Varenne Eau et Agriculture, impact cumulé



Un guide pratique pour évaluer le Réservoir en Eau Utilisable des sols

Les sols, de par leurs multiples fonctions, contribuent à de nombreux services rendus par les écosystèmes, en particulier ceux qui mettent en jeu le cycle de l'eau : production de biomasse, recharge des aquifères, régulation des crues, atténuation des contaminations par dégradation des produits polluants. Pour évaluer ces services, il est nécessaire de connaître la capacité des sols à stocker et restituer de l'eau pour les plantes, c'est-à-dire son Réservoir en Eau Utilisable (RU), paramètre mobilisé dans les modèles de bilan hydrique, et fréquemment renseigné dans les Outils d'Aide à la décision, notamment en irrigation. Ce Guide « Réservoir en Eau Utilisable par les cultures » a pour ambition de donner des clés de compréhension pour comprendre les concepts et évaluer au mieux le RU en fonction des données disponibles et de la précision recherchée. Plusieurs méthodes d'estimation sont détaillées, applicables dans des activités de conseil agricole, d'expertise pédologique, d'enseignement et de recherche. Les connaissances récentes en matière d'évaluation du RU ont été mobilisées dans cet ouvrage : rôle des sols et rôle de la culture, prise en compte de la dynamique de l'enracinement, contribution des éléments grossiers du sol, incertitudes sur l'évaluation. Dédié aux grandes cultures, cultures légumières et prairies, ce guide permet des évaluations du RU à l'échelle de la parcelle et sur de petits territoires de France métropolitaine. Il s'enrichit actuellement de travaux d'étudiants qui développent des vidéos pour en expliciter certaines notions-clé, et préparent un outil numérique permettant un calcul automatique du RU.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les sols, de par leurs multiples fonctions, contribuent à de nombreux services rendus par les écosystèmes, en particulier ceux qui mettent en jeu le cycle de l'eau : production de biomasse, recharge des aquifères, régulation des crues, atténuation des contaminations par dégradation des produits polluants ; ces services sont en lien avec le cycle de l'eau et le fonctionnement des sols. En effet les sols, réceptacles des eaux de pluie et d'irrigation, stockent, filtrent, et restituent l'eau sous forme d'eau « bleue » vers les cours d'eau et les aquifères, ou d'eau « verte » évaporée à la surface du sol ou transpirée par les plantes. Evaluer cette capacité des sols à stocker et restituer de l'eau consiste à évaluer son Réservoir en Eau Utilisable (RU), paramètre mobilisé dans les modèles de bilan hydrique, et fréquemment renseigné dans les Outils d'Aide à la décision, notamment en irrigation. C'est l'objet de ce guide que de donner des clés de connaissance et d'évaluation du RU, mobilisables dans des activités de conseil agricole, d'expertise pédologique, d'enseignement et de recherche.

RÉSULTATS

Les auteur.es du Guide « Réservoir en Eau Utilisable par les cultures » se sont donnés comme ambition de produire un guide « pour comprendre » et « pour agir ». Celui-ci valorise les connaissances les plus récentes en matière de RU, acquises notamment dans le projet RUEdesSOLS financé par l'ANR, lequel a mis en lumière les différentes acceptions du RU pour les pédologues et les agronomes (Cousin et al., 2022). Le guide présente les concepts-clés les plus récents pour évaluer le RU : rôle des sols et rôle de la culture, différences entre Réservoir Utilisable et Humidité Utile, importance de la prise en compte des obstacles relatifs et absolus aux racines, contribution des éléments grossiers à l'évaluation. Les chapitres dédiés à la mise en œuvre pratique de l'estimation du RU proposent des solutions adaptées aux besoins spécifiques des utilisatrices et utilisateurs et aux données dont ils et elles disposent ; ces chapitres précisent en outre des méthodes pour connaître les incertitudes associées à l'évaluation. A vocation applicative, le guide répertorie les modes opératoires utiles pouvant être mis en œuvre pour l'évaluation du RU par les approches de terrain.

PERSPECTIVES

Dédié aux grandes cultures, cultures légumières et prairies, ce guide permet des évaluations du RU à l'échelle de la parcelle et sur de petits territoires de France métropolitaine. L'enjeu est désormais d'acquérir de nouvelles références pour évaluer le RU dans d'autres situations agropédoclimatiques, et de proposer des méthodes opérationnelles pour l'évaluation du RU pour les espèces ligneuses pérennes agricoles (vignes et vergers) et forestières.



© I. Cousin

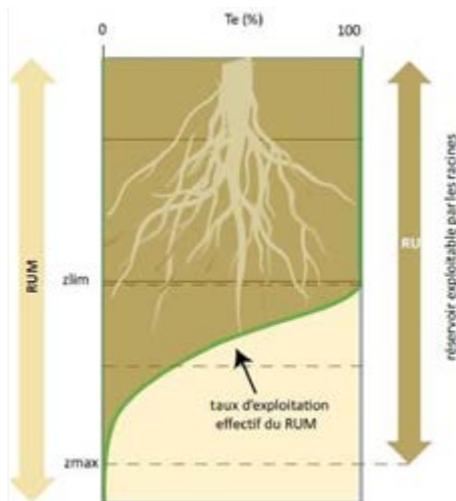


Illustration de l'évaluation du RU par les racines
RU : Réservoir en Eau Utilisable
RUM : Réservoir en Eau Utilisable Maximum
Te : taux d'exploitation par les racines
zlim : Profondeur au-delà de laquelle le taux d'exploitation racinaire est inférieur à 100%
zmax : Profondeur Maximale d'Enracinement

VALORISATION

Des étudiantes et étudiants en agriculture se mobilisent actuellement dans un projet d'accompagnement à la diffusion du Guide en développant des supports vidéos pour expliciter certaines notions-clé présentées dans le document, et en préparant un outil numérique permettant le calcul automatique du RU en fonction des données disponibles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Cousin, I., Buis, S., Lagacherie, P., Doussan, C., Le Bas, C., Guérif, M., 2022. Available water capacity from a multidisciplinary and multiscale viewpoint. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42:46, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00774-8>
- > Bouthier, A., Scheurer, O., Seger, M., Lagacherie, P., Beaudoin, N., Deschamps, T., Sauter, J., Fort J.L., Cousin, I., 2022. Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures. Editions Arvalis, 2022, 100 pages. <https://sols-et-territoires.org/actualites/reservoir-en-eau-du-sol-utilisable-par-les-cultures-guide-destination>



Contacts : Isabelle Cousin, Maud Seger, Philippe Lagacherie

Unités : UR SOLS, UMR LISAH

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Val de Loire

Mots clés : Réservoir utilisable, réserve utile, sol, estimation, méthodes



Comparer les performances environnementales de scénarios de gestion de l'eau à l'échelle des territoires : opérationnalisation du cadre méthodologique de l'ACV territoriale

Dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources, sécuriser les approvisionnements en eau des territoires est un enjeu crucial pour maintenir l'ensemble des activités humaines (agricoles, domestiques, industrielles). Différentes stratégies sont possibles selon le type de ressources mobilisées (une eau locale ou importée, une eau de surface ou souterraine) nécessitant plus ou moins de technologies de traitement et d'infrastructures. Afin d'en évaluer les performances environnementales, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) territoriale permet de comparer leurs éco-efficacités, c'est-à-dire les ratios entre les services rendus et les impacts environnementaux générés. Ce cadre a été appliqué à l'étude de scénarios d'aménagement d'une zone agricole avec ou sans projet d'irrigation (i.e. transfert inter-bassin ou retenue collinaire). La méthode permet d'identifier les meilleurs compromis entre services rendus (ex : sécurité alimentaire, revenus) et / ou impacts environnementaux (nexus eau, énergie, infrastructure). Pour la rendre plus opérationnelle, un calculateur simplifié, le logiciel WASABI (Water System Assessment By LCIA), a été développé pour réaliser des ACV relatives à la gestion de l'eau à l'échelle d'un territoire, en partant du choix de la ressource à prélever jusqu'au traitement des eaux usées et leur réutilisation.

CONTEXTE ET ENJEUX

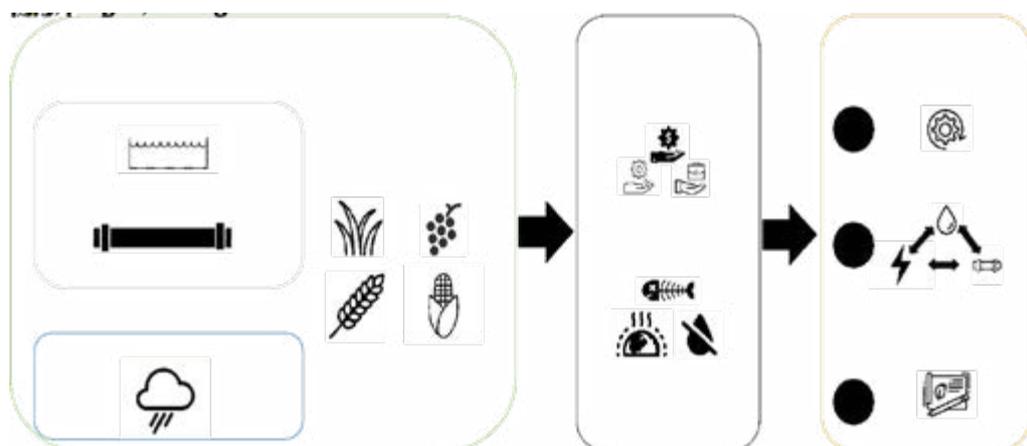
Dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources, sécuriser les approvisionnements en eau des territoires est un enjeu crucial pour maintenir l'ensemble des activités humaines (agricoles, domestiques, industrielles). Les ressources en eau peuvent avoir différentes origines avec un stress plus ou moins marqué selon leur disponibilité spatiale et temporelle. De plus, leur mobilisation repose sur un ensemble de technologies et d'infrastructures pouvant engendrer de nombreux impacts sur l'environnement. Il est donc nécessaire de comparer les performances environnementales de différentes stratégies d'approvisionnement en eau pour identifier les meilleurs compromis entre services rendus par les usages de l'eau et leurs impacts environnementaux. Le cadre méthodologique de l'Analyse du cycle de vie (ACV) territoriale a été développé pour comparer les éco-efficacités de scénarios d'aménagement en tenant compte de la multifonctionnalité des territoires (Loiseau et al. 2013). Il a été appliqué à l'étude de scénarios d'aménagement d'une zone agricole avec ou sans projet d'irrigation (i.e. transfert inter-bassin ou retenue collinaire).

RÉSULTATS

L'étude montre que les performances environnementales des scénarios varient en fonction du service considéré, et de la catégorie d'impact environnemental. Ainsi, le scénario sans irrigation peut présenter une meilleure éco-efficacité pour des fonctions économiques, tandis

que les projets hydrauliques sont plus performants pour les fonctions liées à la production de biomasse. L'analyse du nexus eau-énergie-infrastructure met en évidence les compromis environnementaux entre les deux projets d'aménagement hydraulique pour l'irrigation. Le transfert inter-bassin peut permettre d'utiliser une ressource en eau provenant d'une localisation ne présentant pas de stress hydrique, mais nécessite une forte consommation de matériaux et d'énergie. La retenue collinaire mobilise moins de ressources tout en s'appuyant sur une eau plus rare. Par ailleurs, les performances des scénarios dépendent fortement du contexte local (disponibilité en eau, localisation des ressources, ...), et la démarche d'évaluation doit intégrer les contraintes territoriales pour identifier le scénario le plus éco-efficient. Cette étude souligne l'intérêt de l'ACV territoriale pour éco-concevoir des scénarios d'aménagement. Pour rendre cette démarche plus opérationnelle, le logiciel WASABI a été développé pour fournir un calculateur simplifié d'ACV appliqué à la comparaison de scénarios de gestion de l'eau à l'échelle territoriale, en partant du choix de la ressource à prélever et de son adduction, jusqu'au traitement des eaux usées et leur réutilisation.

Résumé graphique - Performances environnementales de scénarios d'approvisionnement en eau de zones agricoles : mise en œuvre de l'Analyse du Cycle de Vie territoriale

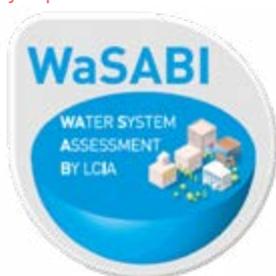


PERSPECTIVES

Ces travaux permettent d'apporter des éléments objectifs sur les compromis entre services rendus et impacts environnementaux générés par des scénarii d'aménagement territorial. L'une des perspectives est d'intégrer des approches prospectives tenant compte de l'évolution de l'environnement et des effets du changement climatique qui peuvent impacter les performances de projets sur le moyen-long terme, notamment sur des territoires agricoles (travaux en cours dans la thèse de Nicolas Rogy, UMR ITAP).

VALORISATION

> Rogy, N., Roux, P., Salou, T., Pradinaud, C., Sferratore, A., Géhéniau, N., Hélias, A., Loiseau, E., 2022. Water supply scenarios of agricultural areas: Environmental performance through Territorial Life Cycle Assessment. J. Clean. Prod. 366, 132862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132862>



> Logiciel WASABI développé par la Chaire d'entreprises en ACV ELSA-PACT (plus d'informations : www.elsa-pact.fr/Ressources/Logiciel-WASABI)

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Loiseau, E., Roux, P., Junqua, G., Maurel, P., Bellon-Maurel, V., 2013. Adapting the LCA framework to environmental assessment in land planning. Int. J. Life Cycle Assess. 18, 1533-1548. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0588-y>



Contacts : Eléonore Loiseau, Arnaud Hélias

Unité : UMR ITAP

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie - Montpellier

Mots clés : Evaluation environnementale, éco-efficience, nexus eau-énergie-infrastructure, aménagement



Exposition généralisée des petits mammifères sauvages aux mélanges de pesticides anciens et actuels dans les paysages agricoles

Un manque important de connaissances sur le devenir des pesticides dans l'environnement et leurs effets non intentionnels entravent la compréhension et l'atténuation de leurs impacts sur la biodiversité. Dans le cadre des projets RESCAPE (RESistance of agricultural landSCAPEs to pesticide transfers in soils and living organisms, Programme Ecophyto 2014) et INEXSS (INnover pour évaluer l'EXposition de la faune Sauvage aux pesticideS, APR Chrysalide Université de Franche-Comté 2017) l'exposition de petits mammifères sauvages aux « anciens » pesticides (interdits et restreints d'usage) et aux pesticides actuellement en usage a été étudiée pour éclairer les connaissances sur ces questions. L'analyse des pesticides présents dans les poils de musaraignes et de mulots montre une contamination généralisée et omniprésente des mammifères, soulevant des questions sur les voies d'exposition et les impacts sur les écosystèmes. Un total de 112 composés (fongicides, herbicides et insecticides) a été détecté, avec 32 à 65 résidus détectés par individu (13 à 26 anciens pesticides et 18 à 41 pesticides actuels chez chaque animal). Nous proposons un concept appelé « biowidening », décrivant une augmentation de la diversité des composés aux niveaux trophiques supérieurs. Ce travail suggère que l'exposition de la faune à des mélanges de pesticides est une règle plutôt qu'une exception, soulignant la nécessité de prendre en compte le concept d'exposome et remettant en question la pertinence des processus actuels d'évaluation et d'atténuation des risques.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les lacunes dans les connaissances concernant le rôle potentiel des pesticides dans la perte de la biodiversité dans le monde limitent l'évaluation des risques liés aux impacts involontaires des pesticides. Ceci rend essentielle la surveillance de l'exposition de la faune à ces composés. L'exposition de petits mammifères sauvages aux « anciens » pesticides (interdits et restreints d'usage) et aux pesticides actuellement en usage a été étudiée pour éclairer les connaissances sur ces questions. Des mulots du genre *Apodemus* (omnivores) et des musaraignes de l'espèce *Crocidura russula* (insectivores) ont été capturés dans deux zones de paysages agricoles français (Zone Atelier Plaine et Val de Sèvre et Zone Atelier Arc Jurassien). Les concentrations de 140 substances chimiques mères et métabolites ont été analysées dans des échantillons de poils (93 individus).

RÉSULTATS

Tous les animaux capturés étaient imprégnés de pesticides. Un total de 112 composés a été détecté, montrant une exposition des petits mammifères aux fongicides, herbicides et insecticides, avec 32 à 65 résidus détectés par individu (13 à 26 anciens pesticides et 18 à 41 pesticides actuels chez chaque animal) ; 13 anciens pesticides et 25 pesticides actuels ont été détectés chez plus de 75% des individus. Des concentrations supérieures à 10 ng g⁻¹ ont été quantifiées pour 7 anciens pesticides et 29 pesticides actuels (chez 46% et 72% des individus, respectivement), et supérieures à 100 ng g⁻¹ pour 10 pesticides actuels (chez 22% des individus). La contamination



Photo d'une musaraigne © Clémentine Fritsch



Des estimations d'impacts environnementaux plus précises à l'aide du machine learning

Actuellement, un challenge important consiste à estimer les impacts environnementaux en sortie de différents procédés (par exemple ceux utilisés dans le traitement des eaux usées), notamment afin de pouvoir comparer différents scénarios ou détecter les molécules nécessitant une attention spécifique. Cette estimation globale est rendue difficile par le manque de facteurs de caractérisation permettant de quantifier l'écotoxicité de chaque molécule. Obtenir ces facteurs de caractérisation pour toutes les molécules potentiellement impactantes nécessiterait de nombreuses expériences qui sont fastidieuses, longues et coûteuses. Afin de pallier ce manque, nous avons défini une procédure de modélisation, basée sur des méthodes de machine learning et permettant d'obtenir, pour n'importe quelle molécule, un facteur de caractérisation (toxicologique ou écotoxicologique) en partant de descripteurs moléculaires faciles à obtenir. Ces nouveaux facteurs de caractérisation ont ensuite permis une estimation plus fiable des impacts potentiels totaux subis, jusqu'à présent fortement minimisés, et une priorisation plus pertinente sur les micropolluants à cibler.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les utilisateurs d'analyse de cycle de vie font actuellement face à un important challenge : celui d'identifier toutes les substances ayant un impact écotoxicologique non négligeable. Cette identification est rendue encore plus difficile par le manque de facteurs écotoxicologiques qui peut rendre les résultats très partiels et, par conséquent, difficiles à interpréter (Aemig et al. 2021). Obtenir des facteurs écotoxicologiques de manière rapide et facile devient alors une étape clé dans l'identification de ces substances présentant un risque potentiel. Néanmoins, les expériences nécessaires pour cela sont fastidieuses, longues et coûteuses. Une méthode de modélisation qui pourrait prédire ces facteurs écotoxicologiques en se basant sur des descripteurs moléculaires faciles à obtenir serait ainsi fort utile.

RÉSULTATS

Nous avons testé différentes méthodes de modélisation (linéaires ou de machine learning) afin de prédire deux facteurs de caractérisation (écotoxicologique et relatif à la santé humaine) dans l'eau douce continentale. Ces modèles se basent sur 40 descripteurs moléculaires qui peuvent être obtenus assez rapidement pour n'importe quelle molécule. Les modèles de machine learning ont démontré des performances meilleures que les méthodes linéaires, avec une précision de l'ordre de celle des résultats obtenus expérimentalement, ce qui permet d'avoir une bonne confiance en leurs prédictions. Enfin, les meilleurs modèles ont été sélectionnés puis utilisés pour prédire des dizaines de facteurs de caractérisation manquants.

PERSPECTIVES

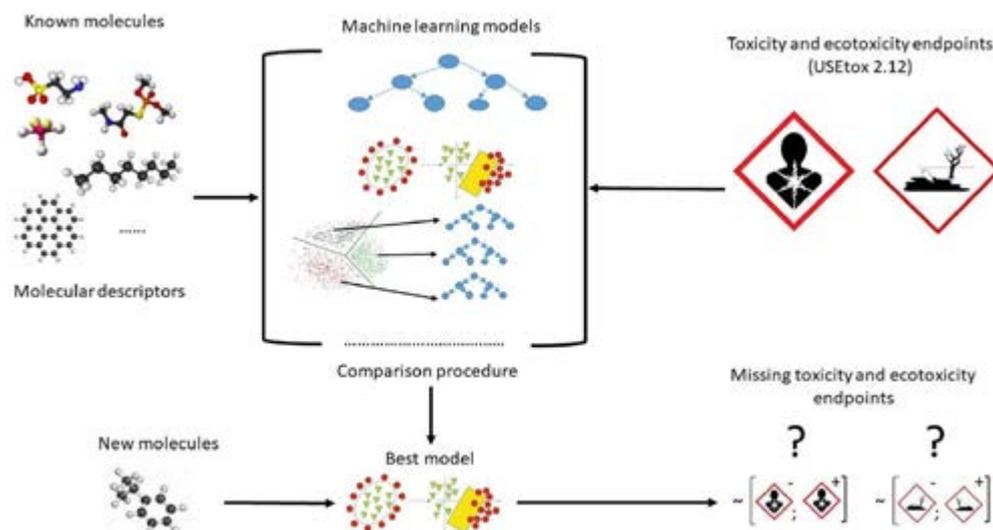
Les modèles développés dans cet article (et disponibles en open Access) ont ensuite été utilisés dans un autre article afin de compléter les études précédentes. Ils ont notamment permis de démontrer que, pour les impacts sur la santé humaine, un certain nombre de molécules (parmi lesquelles l'isodrine organochlorine ou l'hexabromocyclododecane) avaient un effet significatif alors que, concernant

l'écotoxicologie, la grande majorité des impacts potentiels étaient dus à une molécule, la cyperméthrine (Servien et al, 2022b). Néanmoins, les impacts potentiels restent non calculés pour les composés pour lesquels la concentration mesurée est inférieure à la limite de quantification, biaisant les résultats finaux. Estimer l'ordre de grandeur des impacts potentiels même pour les molécules dont la concentration mesurée est inférieure à la limite de quantification est la suite logique de ce travail. Il est à noter également que la méthodologie développée dans cet article peut s'adapter à n'importe quel autre compartiment (sol, air ...) pourvu que des données permettant de caler les modèles soient disponibles.

VALORISATION

> R. Servien, E. Latrille, D. Patureau and A. Hélias. Machine learning models based on molecular descriptors to predict human and environmental toxicological factors in continental freshwater. Peer Community Journal (2022), 2 :e15. <https://doi.org/10.24072/pcjournal.90>

> L'autre article Servien et al. (2022b) (R. Servien, C. Leenknecht, K. Bonnot, V. Rossard, E. Latrille, L. Mamy, P. Benoit, A. Hélias, D. Patureau. Improved impact assessment of micropollutants release from WWTPs, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering (2022), 5, 100172, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100172>) utilise ensuite les modèles développés



Estimation d'impacts environnementaux à partir de modèles de machine learning basés sur des descripteurs moléculaires © Rémi Servien

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Aemig, Q., Hélias, A., Patureau, D., 2021. Impact assessment of a large panel of organic and inorganic micropollutants released by wastewater treatment plants at the scale of France. Water Research, 188, 116524, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116524>.



Contact : Rémi Servien

Unité : LBE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie - Montpellier

Mots clés : Machine learning, life cycle assessment, impact assessment, micropollutants, open science



Vers le développement de composés pharmaceutiques durables : caractérisation de la dégradation et évaluation écotoxicologique d'un analogue d'anticancéreux éco-conçu

Pour limiter la contamination de l'environnement par les composés pharmaceutiques et les impacts associés, un levier prometteur est l'écoconception. Cette approche préventive et innovante vise à proposer des substituts écoconçus se dégradant facilement et conduisant à des produits de transformation inoffensifs dans l'environnement. Elle a été évaluée en utilisant l'anticancéreux méthotrexate (MTX) comme modèle : il est cytotoxique, présent dans les eaux usées et produit un métabolite nocif et persistant (le 7-hydroxyméthotrexate, 7-OH-MTX). L'étude a été menée par comparaison avec un analogue (OMTX) synthétisé selon l'hypothèse qu'il sera moins persistant et produira des produits de transformation moins toxiques tout en conservant son efficacité thérapeutique. Cette hypothèse a été testée via l'étude i) de la photodégradation avec la mise en évidence de nombreux produits de transformation issus de MTX et de OMTX, révélant des voies de dégradation similaires et une dégradation plus rapide à une longueur d'onde de 254 nm pour OMTX ; ii) de la biodégradation par une boue activée et l'impact en retour sur les communautés microbiennes, montrant une biodégradation plus rapide du OMTX, quelques produits de transformation additionnels, y compris le 7-OH-MTX qui est apparu mineur et transitoire, mais sans d'effet écotoxicologique majeur ; iii) de la cytotoxicité au cours de la photodégradation et de la biodégradation montrant une perte de l'action pharmaceutique d'origine et enfin iv) l'évaluation de l'écotoxicité aiguë sur des organismes aquatiques en faveur de l'OMTX.

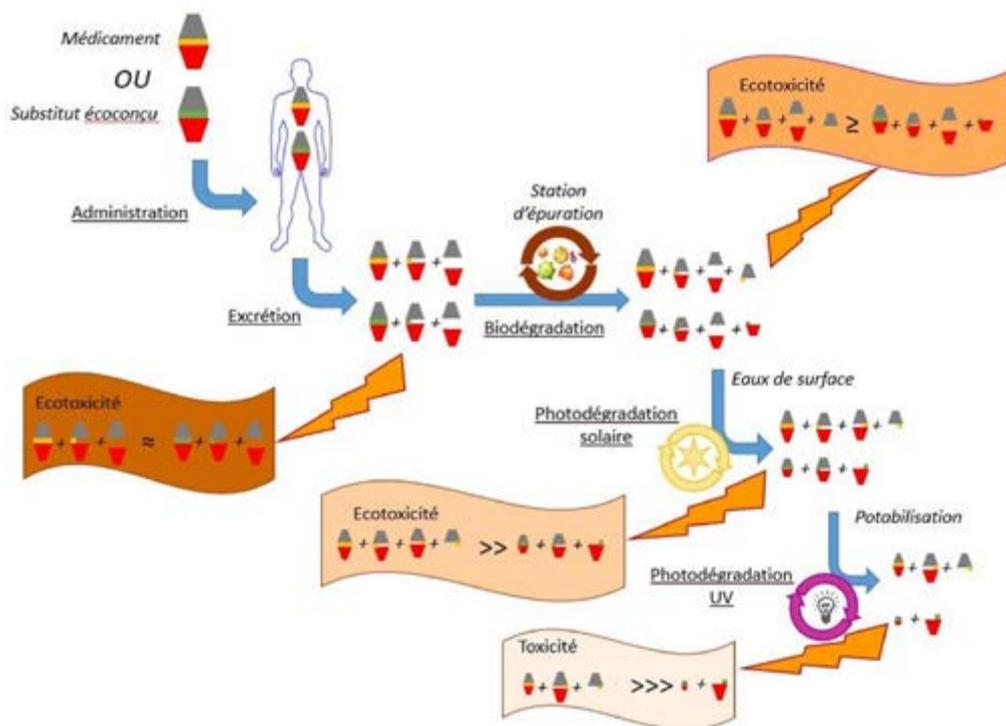
CONTEXTE ET ENJEUX

Les composés pharmaceutiques ne sont que partiellement éliminés dans les stations d'épuration et souvent détectés dans les eaux naturelles où ils peuvent impacter les organismes aquatiques. Des traces des plus persistants peuvent même être retrouvées dans les eaux potables. De plus, la présence et l'impact de leurs produits de transformation restent souvent inconnus. Pour limiter cette contamination un levier prometteur est l'écoconception, qui prend en compte, dès le développement des molécules pharmaceutiques, leur devenir et leur impact environnemental. Une molécule écoconçue conserverait son activité thérapeutique dans le corps humain mais se dégraderait facilement dans l'environnement et y produirait des produits de transformation inoffensifs. Cette approche innovante a été évaluée dans le projet EDIFIS portant sur une stratégie d'écoconception de médicaments par incorporation d'une structure auto-immolable (ANR 2017-2021, coordination Raphaël Labruère, UMR ICMMO, Univ. Paris-Sud). Un composé pharmaceutique modèle et son analogue écoconçu ont été comparés en termes de persistance et de toxicité des produits de transformation formés, lors de trois étapes importantes du cycle de l'eau où une dégradation peut avoir lieu : un traitement par boues activées (utilisé en stations d'épuration), par photodégradation sous l'action de la lumière solaire (intervenant dans les eaux de surface) ou de lumière UV (utilisé en potabilisation). Le composé était l'anticancéreux méthotrexate (MTX), classé dans la liste prioritaire pour les risques liés à l'environnement. L'objectif de ce travail était de démontrer expérimentalement l'intérêt de cet analogue en termes de réduction des impacts écotoxicologiques.

RÉSULTATS

Les cinétiques de dégradation de l'OMTX se sont révélées similaires à celles du MTX en photodégradation sous rayonnement solaire, 1,7 fois plus rapides lors de la biodégradation par une boue activée et 32 fois plus rapides par photodégradation UV, montrant ainsi la limitation de la persistance permise par l'écoconception. En photodégradation, 11 produits de transformation ont été identifiés par spectrométrie de masse pour le MTX et 12 pour le OMTX, avec des voies de dégradation globalement communes. Huit produits de transformation additionnels obtenus par biodégradation ont été mis en évidence pour le MTX, contre seulement 4 produits de transformation pour l'OMTX. En parallèle, le suivi de la cytotoxicité a montré une perte de l'action pharmaceutique d'origine pour les deux molécules. Cette perte, y compris si elle était comparée en prenant en compte le degré d'avancement des réactions, était plus rapide pour OMTX, montrant là encore l'intérêt de l'écoconception. Enfin, la toxicité aigüe de OMTX pour les algues *Raphidocelis subcapitata* était 88 fois inférieure à celle de MTX.

Evolution schématisée d'un médicament et de son substitut écoconçu suite au traitement et à leur dégradation lors du cycle de l'eau, et de l'écotoxicité associée



PERSPECTIVES

Cette étude menée sur un composé-modèle a montré l'intérêt de la stratégie d'écoconception. D'autres contaminants pourraient bénéficier d'une approche similaire, qui est préconisée par les institutions américaines et européennes avant l'autorisation de mise sur le marché de nouvelles substances. La prise en compte systématique du cycle de vie complet des produits pharmaceutiques devrait entrer dans la réglementation imposant l'innocuité des nouveaux ingrédients pharmaceutiques sur l'environnement.

VALORISATION

> 2 publications scientifiques + 2 en cours de préparation, 2 communications dans des colloques internationaux (Icraphe 2019, Ecotoxicomic 2021) et 2 interviews de la doctorante (France Culture et France 5).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Espinosa A., Néliu S., Lieben P., Skarbek C., Labrière R., Benoit P. Photodegradation of methotrexate in aqueous solution: degradation kinetics and identification of transformation products. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29 (4), 6060-6071. (10.1007/s11356-021-15820-3)

- > Espinosa A., Rascol E., Abellán Flos M., Skarbek C., Lieben P., Bannerman E., Martinez A.D., Pethe S., Benoit P., Nélieu S., Labruère R. Re-designing environmentally persistent pharmaceutical pollutant through programmed inactivation: The case of methotrexate. *Chemosphere*, 2022, 306, 135616. (10.1016/j.chemosphere.2022.135616)
- > Espinosa A. Vers le développement de composés pharmaceutiques durables : Caractérisation de la dégradation et évaluation écotoxicologique d'un analogue d'anticancéreux éco-conçu. *Ecologie, Environnement. AgroParisTech*, 2022. Français. (NNT : 2022AGPT0004)
- Espinosa A., Nélieu S., Claire-Sophie Haudin, Vieublé-Gonod Laure, Claire Vieules Labruère R. Biodegradation by activated sludge and feedback impact on the microbial community: comparison of methotrexate and its eco-designed analogue. *Ecotoxicomic YR 2021*, Nov 2021, Webinar, France (hal-03542417v1)
- > Espinosa A., Pandard P., Gaudillot A., Thevenin M., Labruère R., Benoit P., Nélieu S. Comparison of the acute aquatic toxicity of the methotrexate and its eco designed analog. A soumettre à *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
- > Espinosa A., Cheviron N., Haudin C.S., Vieublé-Gonod L., Benoit P., Labruère R., Nélieu S. Biodegradation by activated sludge of methotrexate and its eco-designed analogue and feedback impact on the microbial community. A soumettre à *Water Research*.



Contacts : Pierre Benoit, Sylvie Nélieu

Unité : UMR Ecosys – collaborations ICMMO (Univ Paris-Sud) et Ineris

Départements : AgroEcoSystem, SPE

Centre INRAE : Île-de-France Versailles-Saclay

Mots clés : Produits pharmaceutiques, écoconception, eau, photo- et biodégradation, identification structurale, produits de transformation



Paname 2022 : des campagnes pour étudier la qualité de l'air et le climat urbain

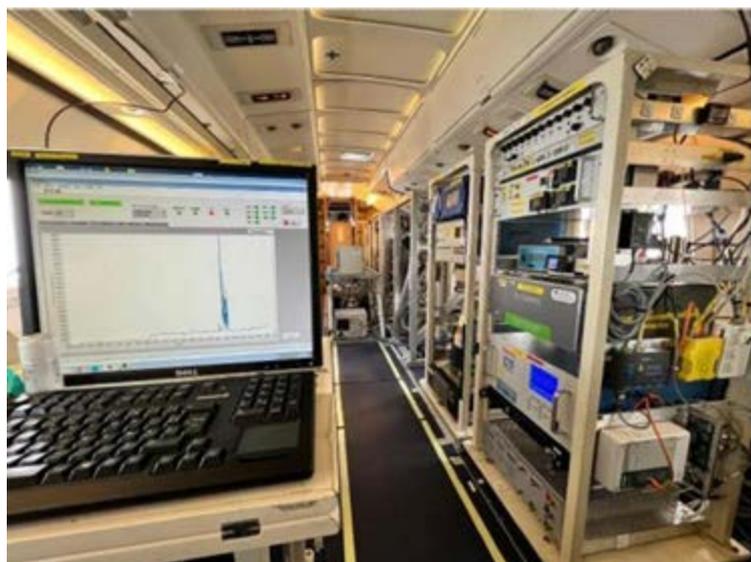
Évolution de la qualité de l'air en zone urbaine et péri-urbaine, impact du changement climatique sur les villes, contributions des villes aux émissions de gaz à effet de serre, effets des milieux urbains sur les phénomènes météorologiques extrêmes, ou encore liens entre ville et santé de ses habitants... Ce sont tous ces aspects que vont scruter les dix projets scientifiques réunis au sein de l'initiative Paname 2022. Cet ensemble de campagnes, qui battent leur plein à l'été 2022 à Paris et alentours, rassemble des scientifiques et des laboratoires du CNRS, de Météo-France, de l'Université Paris-Est Créteil, de Sorbonne Université, de l'Institut polytechnique de Paris, de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, d'INRAE, de LigAir et d'Airparif.

L'initiative Paname 2022 a pour ambition de mieux comprendre les causes et effets du changement climatique en environnement urbain, grâce à des campagnes intensives de mesures qui se tiendront en région parisienne à l'été 2022. Celles-ci ont pour ambition de nous donner des clés pour rendre les villes plus résilientes au climat futur. Les résultats obtenus pourront également aider à repenser la construction des zones urbaines, afin de lutter contre plusieurs risques pour la santé humaine : chaleur intense, pollution de l'air et autres phénomènes météorologiques extrêmes. Des enjeux majeurs lorsque l'on sait qu'aujourd'hui, près de 50% de la population mondiale vit en zone urbaine.

Paname 2022, ce sont dix projets rassemblés afin de développer une synergie, et de mutualiser des moyens et des mesures. Si certains projets ont d'ores et déjà débuté, la plupart démarrent à partir de juin 2022 en Île-de-France. Les sites de mesure sont déployés aussi bien en cœur de ville (Hôtel de ville, Sorbonne Université, Paris-Rive-Gauche) qu'en proche banlieue (Bois de Vincennes, Créteil, site de l'école polytechnique), ou en zone péri-urbaine en Forêt de Rambouillet, et même jusqu'à Orléans. Des vols avec l'avion scientifique ATR-42 de SAFIRE seront également effectués pour suivre l'évolution des masses d'air urbaines et péri-urbaines lorsqu'elles sont transportées d'une zone à l'autre par le vent.

Paname 2022 aborde également les problématiques de la pollution de l'air et du climat urbain de manière globale et avec une forte interdisciplinarité mêlant physique, chimie de l'atmosphère, sciences météorologiques et climatiques, écologie, voire même médecine ou sciences humaines et sociales pour certains des projets.

Certaines des mesures initiées par ces campagnes ont vocation à perdurer jusqu'à l'horizon des Jeux olympiques Paris 2024, avec l'objectif d'améliorer la prévision de la qualité de l'air ainsi que les prévisions météorologiques des Jeux. Durant cette période, elles permettront de mesurer les conditions météorologiques en ville, les gaz à effet de serre, certains composés réactifs gazeux et particulaires, ainsi que la dynamique atmosphérique en zone urbaine. En ligne de mire : mieux connaître la composition chimique de l'atmosphère, le phénomène d'îlot de chaleur urbain et le transport de chaleur, améliorer les prévisions météorologiques ou de qualité de l'air en ville, mais aussi comprendre l'impact



Vue de l'intérieur de l'avion de recherche de ATR 42 de SAFIRE en configuration de vol scientifique ACROSS
© Vincent MICHOU ACROSS 2022 / CNRS

des pics de pollution et des vagues de chaleur sur la santé. L'ensemble des données collectées seront mises à disposition via le pôle national de données atmosphériques AERIS. (<https://paname.aeris-data.fr/>).



Photos des stations - <https://www.infoclimat.fr> - Paris Seine - Tour Zamansky, Jussieu (75)



Vue de l'observatoire atmosphérique SIRTA, regroupant 150 capteurs.
Palaiseau, Plateau de Saclay
© Jean-Charles Dupont / IPSL / CNRS - Ecole polytechnique - UVSQ

Haut gauche : Photomètre scrutant la quantité d'aérosol au-dessus de la Forêt de Rambouillet depuis la tour d'observation ACROSS © Jean-Francois Doussin / ACROSS 2022 / CNRS

Bas gauche : Vue de la plateforme QUALAIR depuis le toit du 24ème étage de la tour Zamansky – Campus Pierre et Marie Curie, Sorbonne Université - Paris 5^{ème} © QUALAIR / CNRS

Les 10 projets regroupés au sein de Paname 2022 en quelques lignes :

- > Make Our Planet Great Again « ACROSS » (du 13 juin au 25 juillet) complétés de l'ANR ACROSS-Airborne Operation et du Programme National LEFE CHAT « ACROSS Ground Operation » : améliorer les connaissances sur les transformations chimiques dans l'atmosphère et l'interaction entre les émissions des végétaux et les émissions humaines de polluants, et leur rôle sur la qualité de l'air. <https://across.cnrs.fr/>
- > ANR « H2C » (du 13 juin au 15 juillet) : étudier l'impact, sur la santé humaine, de l'exposition à la chaleur et aux polluants atmosphériques.
- > ANR « MOSAI » (de janvier à novembre 2022) : améliorer la représentation des échanges entre la surface du sol et l'atmosphère dans les modèles météorologiques et climatiques. <https://mosai.aeris-data.fr/>
- > ANR « STREET » (du 1^{er} juin au 8 juillet) : étudier, en zones urbaines, l'impact du stress hydrique sur les arbres, notamment sur leurs émissions de composés organiques volatils.
- > Research Demonstration Project « Paris Olympics 2024 » soutenu par l'Organisation Météorologique Mondiale (du 15 juin 2022 à la fin de l'été 2023) : étudier les phénomènes d'îlots de chaleur urbains, d'orages en vue d'améliorer leur modélisation et leur prévision. https://www.umr-cnrm.fr/RDP_Paris2024/
- > Projet H-2020 « RI-Urbans » (débuté en 2022 pour 4 ans) : développer de nouveaux systèmes d'observations adaptés aux nouvelles sources de polluants en environnement urbain et évaluer leurs impacts sur la santé humaine. <https://riurbans.eu/>
- > Projet H-2020 « PAUL - Pilot Applications in Urban Landscapes » (à partir du 1^{er} octobre) : cartographier et développer un système d'observations systématiques des gaz à effet de serre pour les environnements urbains. <https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities-project>
- > Pollusport (à partir de septembre 2022 et pour 2 ans) : étudier l'impact de la pollution de l'air sur la santé et les performances des sportifs

> ERC « Urbisphere » (de janvier à décembre 2023) : comprendre, prévoir et projeter les interactions entre le changement climatique et les transformations urbaines. <http://urbisphere.eu/>

> « Dynamics » (depuis 2021 et pour une durée de 4 ans) : développer les systèmes d'observations de la dynamique atmosphérique en milieu urbain, et améliorer la compréhension des écoulements, mélanges, transports, dispersion de l'air. <https://paname.aeris-data.fr/projects/dynamics/>

VALORISATION

> Communiqué de presse <https://www.inrae.fr/actualites/paname-2022-campagnes-etudier-qualite-lair-climat-urbain>



Contact : Jean-François Doussin

Unité : CNRS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Île-de-France - Versailles-Saclay

Mots clés : Pollution atmosphérique, ville, changement climatique

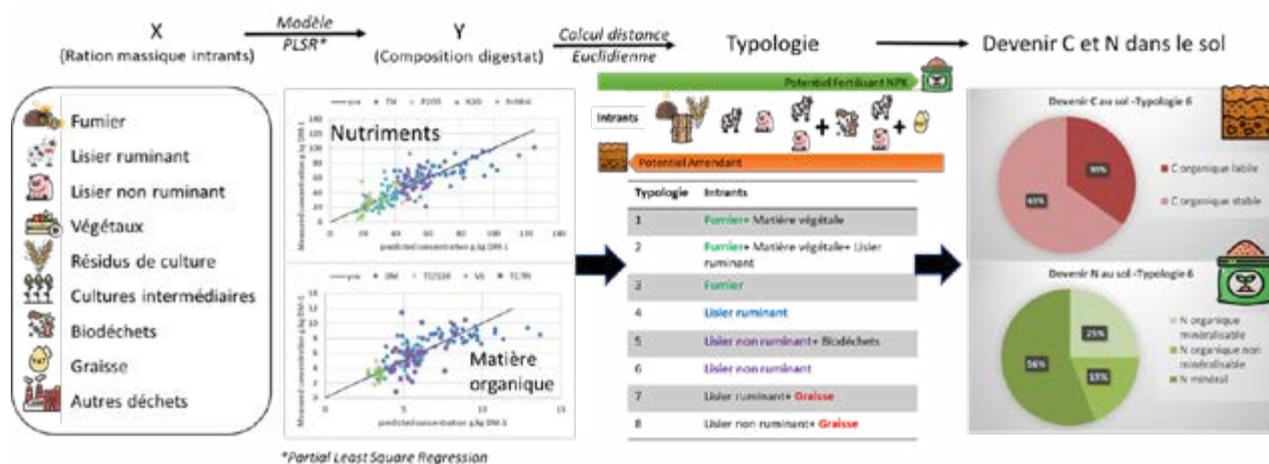


Concept-Dig : Outil d'aide à la conception des traitements des digestats agricoles en vue de leur valorisation agronomique

Le projet Concept-Dig financé par l'ADEME (2016-2019) et porté par INRAE a eu comme objectif de produire un outil d'aide à la conception de filière de traitement de digestats agricoles pour leur utilisation agronomique. Cet outil repose sur une enquête menée auprès de 72 sites de méthanisation de l'AAMF (Agriculteurs Méthaniseurs de France) et sur des expérimentations et suivis des procédés de traitement des digestats (séparation de phases, stockage, compostage et incubation sur sols). A partir de la ration intrante du digesteur, un calculateur permet de prédire la qualité agronomique du digestat (composition biochimique et valeur agronomique amendante et fertilisante). A partir de ces données ou de résultats d'analyses d'un digestat, d'autres calculateurs permettent de prédire la qualité du digestat traité après séparation de phase et stockage et de positionner ce dernier par rapport à une typologie réalisée dans le cadre de Concept-Dig. Cet outil est désormais en ligne sur la plateforme web de la méthanisation de GRDF.

CONTEXTE ET ENJEUX

La méthanisation peut être un levier d'action dans la transition agroécologique afin de boucler les cycles biogéochimiques dans un contexte de bioéconomie circulaire. Ce procédé biologique permet de valoriser les résidus organiques en énergie (via la production de méthane) et de produire un co-produit appelé "digestat" contenant en théorie les nutriments et la matière organique susceptibles de couvrir tout ou partie des besoins des agroécosystèmes et lui conférant ainsi un potentiel fertilisant organique élevé (Guilayn et al., 2020). Toutefois, la qualité agronomique des digestats est d'autant plus variable qu'il y a d'intrants en méthanisation et de post-traitements appliqués. Cette variabilité peut néanmoins être considérée comme une opportunité afin de mieux contrôler l'adéquation entre digestats et besoins des agroécosystèmes. C'est dans ce contexte qu'est né le projet Concept-Dig financé par l'ADEME (2016-2019) dont l'objectif était de développer un outil d'aide à la conception des post-traitements des digestats (i) en réalisant une typologie des digestats ; (ii) en évaluant l'impact des post-traitements sur leur qualité agronomique et (iii) en modélisant la filière de méthanisation depuis les intrants jusqu'à la qualité et aux propriétés agronomiques des digestats.



Méthodologie de développement du modèle de prédiction de la composition et de la typologie des digestats

RÉSULTATS

A partir d'une enquête auprès de 72 sites en France et d'une collaboration avec l'AAMF (Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France), des données sur la qualité agronomique globale¹ des digestats avant et après post-traitements ont été inventoriées. Des analyses statistiques (analyses en composantes principales et méthodes de classification) ont montré que 8 types de digestats bruts existaient, associés à leurs intrants majoritaires ; une différence significative selon le type d'animal ayant produit les effluents (ruminants versus non ruminants) est ainsi apparue. A partir de ces résultats et de la connaissance exacte de la recette massique des intrants (classés en 10 catégories), un modèle de prédiction de type régression a été proposé afin de prédire la composition globale des digestats. De plus, le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote, ainsi que l'azote disponible pour les plantes ont pu être calculés par typologie afin de donner une idée du potentiel fertilisant et amendant du digestat. Enfin, des bilans matières effectués sur sites et fondés sur les travaux de Guilayn et al. (2019) sur la séparation de phases ainsi que l'évaluation d'abattements des éléments pendant le stockage des digestats bruts, liquides et solides en réacteurs laboratoires ont permis de calculer la composition globale des digestats après post-traitements. Un outil web développé sous Rshiny a ensuite été proposé en 2019, puis amendé en 2022 avec le soutien de GRDF et des premiers retours utilisateurs.

PERSPECTIVES

Le projet Ferti-Dig (ADEME/GRDF, 2021-2024) a l'ambition d'aller plus loin et de proposer un guide de bonnes pratiques d'utilisation des digestats en agriculture. Ce guide se fondera sur la typologie des digestats qui sera mise à jour (inventaire de plus de 810 digestats) et l'enrichissement de la base de données donnera lieu à la mise à jour du modèle statistique et des propriétés agronomiques par typologie, rendant l'outil plus robuste et précis.

VALORISATION

> Présentations dans des conférences nationales (JRI, 2020) et internationales (Anaerobic Digestion Conference 17, 2022)

> Déclaration d'invention déposée en 2019

> Marque CONCEPT DIG déposée (23/11/21), N°214819581

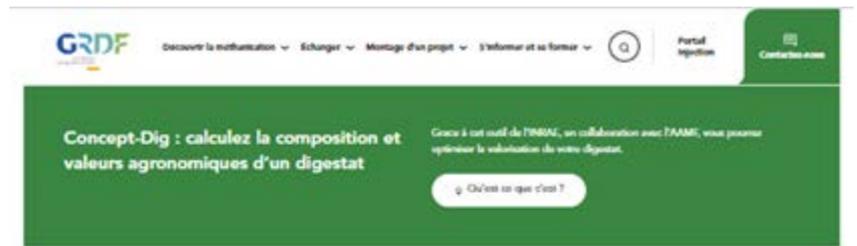
Dépôt APP : N°IDDN.FR.001.280008.000.S

.P.2022.000.10000 (11/07/2022)

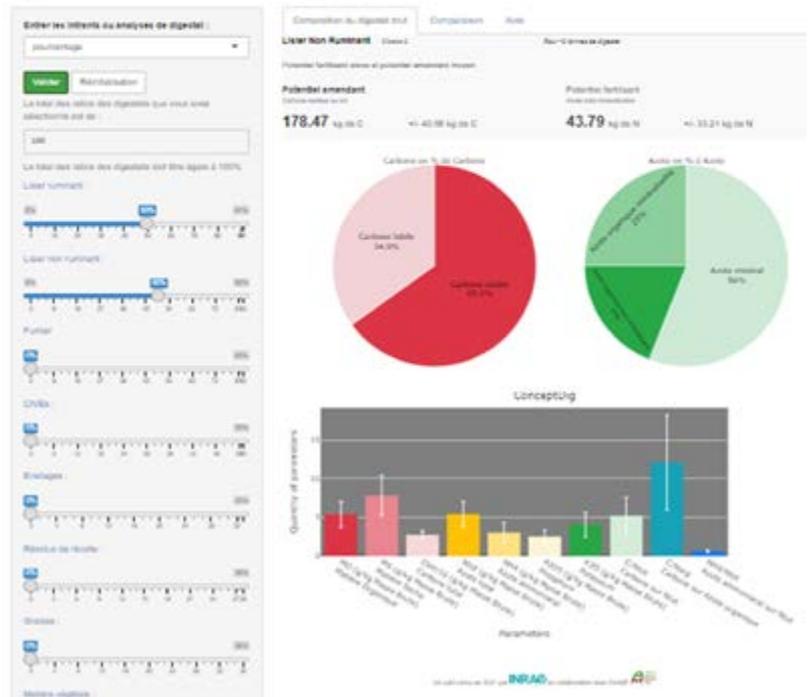
> Outil web mis en ligne sur la plateforme méthanisation GRDF (oct 2022) <https://projet-methanisation.grdf.fr/sinformer-et-se-former/performance-agro-environnementale-de-la-methanisation/concept-dig-calculez-la-composition-et-valeurs-agronomiques-dun-digestat>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Felipe Guilayn, M. Rouez, M. Crest, Dominique Patureau, Julie Jimenez (2020). Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review. Reviews in Environmental Science and Bio/technology



Digestats : outil de calcul de la composition



Screenshot de l'outil sur la plateforme méthanisation GRDF

- > Felipe Guilayn, Julie Jimenez, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2019b). Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice. *Bioresource Technology*, 274 180-189.
- > Julie Jimenez, Virginie Rossard, Eric Latrille, Florian Christ, Romain Girault, Jean-Michel Commandre, Sabine Houot (2019). Outil d'aide à la conception de filière pour la valorisation agronomique des digestats : Concept-Dig.



Contact : Julie JIMENEZ

Unité : UR LBE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Mots clés : Digestats, méthanisation, composition agronomique, fertilisants, amendement, post-traitements

¹ Matière Sèche (MS) en g/kg Matière Brute, Matière Organique (MO), Carbone Total (CT), Azote Total (NT), Phosphore Total (P_2O_5), Potassium total (K_2O), en g/kg MS, ratios C/N, NH_4/NT



La moitié du phosphore disponible des sols agricoles mondiaux provient des engrais minéraux phosphatés

Depuis les années 1950s, l'utilisation massive d'engrais minéraux phosphatés a permis d'augmenter les rendements agricoles dans de multiples régions du monde. Ces engrais sont issus de l'extraction et du traitement chimique de roches phosphatées, une ressource non renouvelable et dont les gisements sont très mal répartis dans le monde. Le phosphore issu du traitement chimique de ces roches phosphatées et utilisé sous forme d'engrais ou dans l'alimentation animale est ici appelé phosphore anthropogénique. A partir d'un modèle dynamique simulant les flux de phosphore dans les écosystèmes agricoles, nous avons estimé, pour chaque pays du monde et sur la période 1950-2017, l'évolution de la fraction du phosphore du sol d'origine anthropique (ou signature anthropogénique). Nos résultats montrent qu'en 2017, la moitié du phosphore disponible des sols agricoles mondiaux est issue de l'application cumulée de phosphore anthropogénique. Cette forte valeur s'accompagne d'importantes inégalités entre pays, en lien avec l'historique d'intensification de la fertilisation. Les pays d'Europe de l'ouest, d'Amérique du nord et d'Asie présentent des signatures anthropogéniques en phosphore proche de 60% tandis que les signatures d'une majorité de pays d'Afrique et d'Amérique du sud se situent autour de 30-40%. Ces recours différenciés aux engrais minéraux questionnent sur l'équité de l'utilisation d'une ressource qui a joué un rôle majeur dans l'amélioration des rendements et qui tend à s'épuiser.

CONTEXTE ET ENJEUX

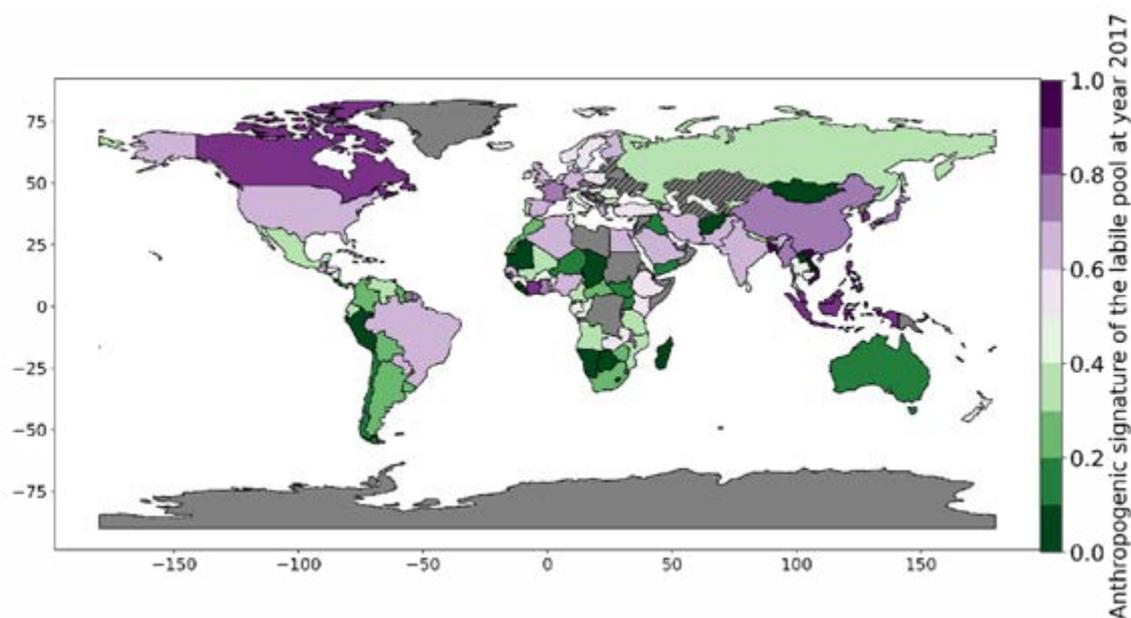
Les engrais minéraux phosphatés sont fabriqués à partir de roches phosphatées, une ressource non renouvelable à l'échelle humaine et en cours d'épuisement. Bien que de nombreuses incertitudes persistent, les estimations convergent vers le fait qu'un pic d'extraction de ces roches devrait être atteint vers le milieu de ce siècle, entraînant une augmentation significative du prix des engrais voire des conflits géopolitiques dus à la concentration des ressources dans un petit nombre de pays. Dans ce contexte, il est important de mieux comprendre la dépendance des systèmes agricoles actuels à l'utilisation des engrais minéraux phosphatés afin de coordonner au mieux la gestion des ressources en roches phosphatées restantes. Pour cela nous avons modélisé l'évolution de la fraction du phosphore des sols agricoles d'origine anthropique (appelé signature anthropogénique) pour chaque pays dans le monde sur la période 1950-2017. La signature anthropogénique est définie comme le ratio entre le phosphore des sols issus d'engrais minéraux et le phosphore total (c.à.d. d'origine anthropique et naturelle). Les calculs ont été faits à l'aide d'un modèle d'évolution des compartiments (labile et stable) de phosphore du sol et de bases de données mondiales relatives aux stocks de phosphore des sols, aux apports d'engrais minéraux phosphatés de synthèse, aux rendements des principales cultures, aux effectifs animaux, aux productions d'effluents et aux échanges internationaux de produits agricoles.

RÉSULTATS

Les résultats montrent qu'en 2017 et à l'échelle globale, $47 \pm 8\%$ du phosphore disponible des sols provient de l'application cumulée d'engrais minéraux, ce qui souligne la très forte dépendance des systèmes agricoles à cette ressource. D'autre part, les résultats reproduisent les dynamiques d'intensification de l'agriculture dans le monde. Dès les années 1950s, la signature anthropogénique en phosphore des pays d'Europe de l'ouest et d'Amérique du nord augmente significativement sous l'effet d'apports massifs d'engrais minéraux. En Europe de l'ouest les signatures se stabilisent à des valeurs proches de 60% à partir des années 1970s, période où commencent à émerger les

préoccupations environnementales liées à l'usage excessif d'engrais azotés et/ou phosphatés. Les signatures des pays d'Asie décollent à partir des années 1970 – ce qui est cohérent avec l'usage massif d'engrais de synthèse promu durant la Révolution Verte pour ces pays – et atteignent en 2017 des valeurs similaires voire supérieures à celles des pays Occidentaux. Cependant contrairement aux pays Occidentaux, les signatures des pays d'Asie continuent toujours d'augmenter sous l'effet d'un apport grandissant d'engrais minéraux. Enfin, de l'autre côté du spectre, les pays d'Afrique et d'Amérique du Sud présentent des signature plus faibles (autour de 30% et 40% respectivement).

Signature anthropogénique en phosphore du compartiment labile des sols agricoles en 2017. Une signature de 1 indique que tout le phosphore contenu dans le compartiment labile du sol est d'origine anthropique. Les pays en gris et gris hachuré ne sont pas considérés par manque de données ou par mauvaise performance du modèle, respectivement.
© Demay et al. 2022



PERSPECTIVES

Ce travail rappelle à quel point les systèmes agricoles ont eu recours aux engrais minéraux phosphatés pour assurer les niveaux de productivité que l'on observe aujourd'hui. Ceci pose question quant à la capacité des systèmes agricoles à s'affranchir de cette ressource dont l'utilisation actuelle n'est pas durable. Le travail soulève aussi des questions d'équité de répartition des ressources. Il semble nécessaire de diriger les ressources restantes en roches phosphatées vers les pays qui en ont le moins bénéficié et où l'apport d'engrais minéraux pourrait significativement contribuer à améliorer les rendements agricoles (Langhans et al., 2022). A l'inverse, les pays ayant beaucoup bénéficié des engrais minéraux et présentant aujourd'hui des stocks élevés en phosphore dans leurs sols ont l'opportunité de mobiliser ces stocks afin d'opérer une transition vers des systèmes agroécologiques fondés sur un meilleur recyclage des nutriments.

VALORISATION

> 1 article scientifique. 1 intervention orale à EGU (European Geosciences Union)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Demay, J., Ringeval, R., Pellerin, S., Nesme, T. 2023. Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. *Nature Geosciences* 16, 69-74 <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01092-0>

> Langhans, C., Beusen, A.H.W., Mogollón, J.M., Bouwman, A.F., 2022. Phosphorus for Sustainable Development Goal target of doubling smallholder productivity. *Nat. sustain.* 5, 57-63.

<https://doi.org/10.1038/s41893-021-00794-4>



Contact : Joséphine Demay

Unité : UMR ISPA

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Nouvelle-Aquitaine Bordeaux

Mots clés : Phosphore, engrais minéral, sol, phosphates naturels, roches phosphatées



Département AgroEcoSystem

228 route de l'Aérodrome

CS 40509

84914 Avignon cedex 9

dpt-agroecosystem@inrae.fr

Rejoignez-nous sur :



inrae.fr/departements/agroecosystem

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



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE