



Département
AgroEcoSystem

INRAE



Faits Marquants 2020

Agronomie et sciences de l'environnement pour les agroécosystèmes

Sommaire >

Changement climatique : il faut prendre en compte la faculté d'adaptation des agriculteurs.....	p.4
Adapter les régions viticoles au changement climatique en mobilisant la diversité des cépages.....	p.7
Valoriser la diversité des cépages pour une viticulture adaptée à la sécheresse.....	p.10
Résistance des arbres aux tempêtes : l'impact de la teneur en eau des sols étudié pour la première fois.....	p.12
Le challenge Global Wheat : une compétition internationale pour automatiser le comptage des épis de blé par analyse d'image.....	p.14
Le RMQS a 20 ans !	p.16
Participation à l'écriture du « Global Soil Biodiversity Report » de la FAO.....	p.19
Contamination des sols et des vers de terre par les pesticides: une menace silencieuse.....	p.21
La réduction de la diversité microbienne du sol induit des émissions de composés organiques volatils.....	p.24
Les paillis au cœur des échanges sol-atmosphère en systèmes sans travail du sol.....	p.26
Un cadre d'évaluation des services rendus par les sols adapté à la planification territoriale.....	p.28
Une nouvelle approche d'estimation des bilans C à la parcelle sur de larges territoires basée sur l'utilisation de données satellites haute résolution.....	p.30
SMOS fête ses 10 ans en orbite.....	p.32

L'eau en milieu agricole : outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale.....	p.34
L'urine humaine : un engrais pour demain ?.....	p.36
Les innovations des agriculteurs, source de connaissances pour la reconception des systèmes agricoles : le cas des associations pluri-spécifiques à base de légumineuses.....	p.39
Conception participative de scénarios agronomiques pour la réintroduction de légumineuses à l'échelle d'un territoire.....	p.41
Rôle des prairies dans les systèmes de culture de demain.....	p.43
Pour une meilleure comparaison entre agriculture biologique et conventionnelle.....	p.45
Quels antagonismes et synergies entre services écosystémiques dans les systèmes de grandes cultures du Nord et du Centre de la France ?.....	p.47
Résilience, vulnérabilité et robustesse des systèmes agricoles tempérés.....	p.49
Le premier modèle prenant en compte les effets des principaux facteurs abiotiques et biotiques sous l'effet des pratiques culturales et de leurs interactions sur la qualité d'implantation des cultures semées.....	p. 51
Une synthèse quantitative de connaissances à l'échelle mondiale révèle des effets positifs de la diversification des systèmes de culture sur les rendements et l'environnement.....	p.53



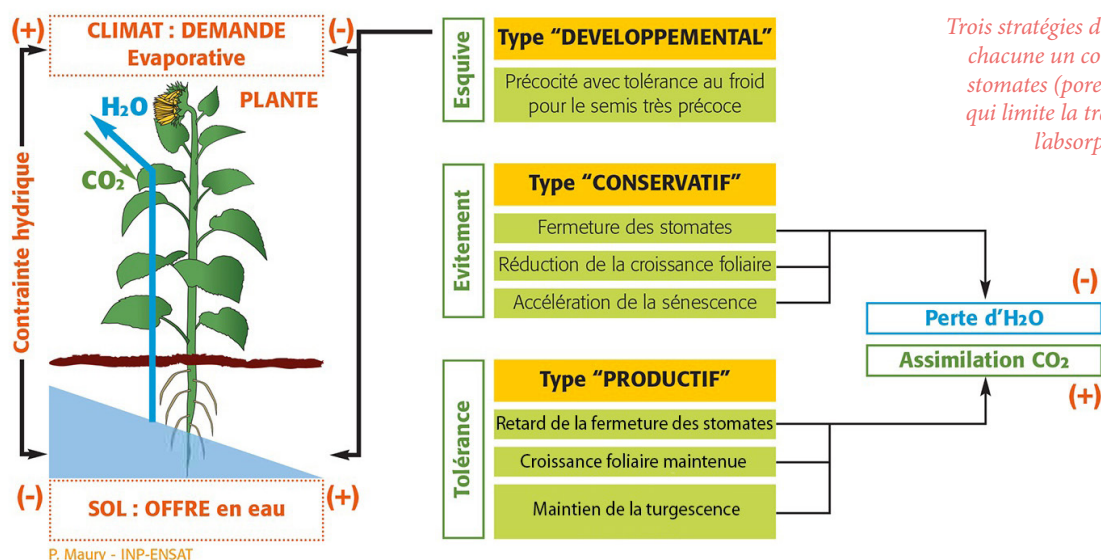
Changement climatique : il faut prendre en compte la faculté d'adaptation des agriculteurs

Face à la variabilité annuelle du climat et aux fréquents épisodes de chaleur et de sécheresse, les agriculteurs doivent choisir des stratégies plus ou moins protectrices en faisant un pari sur le scénario à venir. Une étude d'INRAE sur le maïs en tant que modèle montre qu'ils choisissent globalement les stratégies optimales, de par leur expérience et leur connaissance de leur environnement. Cette faculté d'adaptation est de nature à atténuer les pertes de rendement liées au changement climatique à l'horizon 2050.

CONTEXTE ET ENJEUX

Sécheresse : toute protection a un coût

Confrontées à des stress hydriques et thermiques depuis des millions d'années, les plantes ont évolué et mis en place différents mécanismes de défense graduels, parmi lesquels : diminution de la transpiration via la fermeture partielle des stomates, et, à plus long terme, diminution de la surface foliaire, développement du système racinaire, ou différentes adaptations métaboliques pour maintenir le volume d'eau dans les cellules.



Trois stratégies d'adaptation à la sécheresse, ayant chacune un coût. Par exemple, la fermeture des stomates (pores à la face inférieure des feuilles), qui limite la transpiration, réduit aussi le temps d'absorption de CO₂, et, en conséquence, la photosynthèse et la croissance.

Mais tous les mécanismes de défense ont un coût : une croissance moindre, donc une moins grande compétitivité en milieu naturel par rapport à d'autres espèces plus performantes. Et donc une sorte de « choix » en termes de survie ou de compétitivité.

En conditions de sécheresse, l'agriculteur est confronté au même type de dilemme, que l'on peut simplifier en : protection ou production. Il doit tenir compte de son environnement pédoclimatique, car la stratégie à adopter dépend du type de sécheresse. En fonction des scénarios les plus probables dans sa région, il pourra actionner des mécanismes différents, à travers ses choix de variété et de pratiques culturales :

- > En cas d'année très sèche, raccourcir le cycle de végétation (variété à floraison précoce) permettra de récolter avant que le sol ne soit trop sec, mais au détriment de la production de biomasse
- > En cas d'année sèche et sol profond, un système racinaire développé sera utile pour extraire plus d'eau, mais aura un coût en énergie pour la plante
- > En cas de sécheresse tardive, la réduction de la transpiration (fermeture des stomates et réduction de la surface foliaire) permettra de conserver de l'eau pour la période de sécheresse, mais avec moins de production de biomasse (réduction de la photosynthèse)
- > En année modérément sèche, la croissance pourra être maintenue.

Les variations interannuelles étant pour l'instant plus fortes que l'évolution globale du climat et largement imprévisibles, le choix comporte toujours un risque de perte, si le scénario ne se déroule pas comme prévu. Ainsi, comme au jeu de poker, être trop prudent conduit à gagner moins, mais être imprudent expose à tout perdre... Cependant, les agriculteurs ne s'en remettent pas au hasard, du fait de leur expérience et de leur bonne connaissance du milieu. Une étude parue en 2018 dans PNAS montre qu'ils font en général les bons choix.

RÉSULTATS

Les agriculteurs font majoritairement les choix optimaux

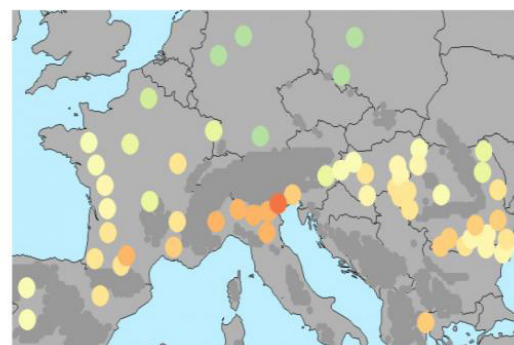
L'étude porte sur le maïs, qui sert de modèle grâce à sa grande diversité génétique et à la simplicité du contrôle de sa floraison. Pour cette espèce (et pour d'autres comme le tournesol, le sorgho, mais pas le blé), l'agriculteur peut jouer sur cycle végétatif⁽¹⁾ avec deux leviers seulement : la date de semis et la date de floraison. En effet, en semant plus tôt et en choisissant une variété qui fleurit plus tard, il peut avancer le cycle cultural dans la saison et en allonger la durée. Ceci est particulièrement utile en cas d'augmentation des températures, qui provoque, chez toutes les variétés, un raccourcissement de ce cycle : il s'ensuit une diminution du rendement, car la photosynthèse se produit pendant une période plus courte. Le choix d'une variété à floraison tardive est un moyen de compenser cet effet des températures. Les chercheurs ont ainsi modélisé la durée optimale du cycle végétatif, entre la levée et la floraison, pour 59 sites européens, avec l'hypothèse que le semis se fait le plus tôt possible (en tenant compte des risques de gel), et en calculant la date optimale de floraison par extrapolation à partir de résultats expérimentaux. Pour cela, 121 variétés de maïs ayant des dates de floraison différentes ont été testées dans plusieurs sites expérimentaux. La date de floraison optimale varie en fonction de chaque site : si elle est trop précoce, le développement est écourté et le rendement moindre, si elle est trop tardive, le remplissage des grains est affecté car il se déroule en conditions trop chaudes ou trop sèches.

La comparaison de ces valeurs théoriques avec les données disponibles dans les bases de données européennes montre que les agriculteurs utilisent, en chaque site, les dates de semis et les précocités proches des optimums calculés par le modèle, maximisant ainsi leur rendement.

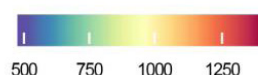
La faculté d'adaptation des agriculteurs compense en partie l'effet du changement climatique

La plupart des études prédisent des diminutions de rendement liées au réchauffement climatique sans prendre en compte cette faculté d'adaptation des agriculteurs. Et, en effet, si les agriculteurs conservaient les variétés et pratiques actuelles en 2050, on peut calculer que le rendement en maïs chuterait de 2% en moyenne en Europe. Mais s'ils continuent à choisir, comme ils le font actuellement, les dates de semis et les variétés les mieux adaptées, le rendement pourrait au contraire être majoré de 4,5% en moyenne.

« Ces résultats ne conduisent pas à minimiser l'impact du changement climatique, ni l'importance de repenser les systèmes de culture car d'autres effets négatifs, comme de nouvelles maladies, peuvent affecter le rendement. Il faut veiller à



Durée levée-floraison (degrés jours)



Modélisation de la durée optimale entre la levée et la floraison (= période végétative) pour 59 sites européens. Cette durée est plus longue pour les pays plus chauds pour compenser le raccourcissement du cycle lié aux températures élevées.

maintenir, ou même à augmenter, la diversité des espèces cultivées, en gardant un équilibre entre des cultures d'été comme le maïs, le sorgho ou le tournesol, et des cultures d'hiver comme le blé ou le colza.

Ce que montre cette étude, c'est qu'il y a des possibilités d'adaptation au changement climatique en utilisant la richesse variétale actuelle, en jouant par exemple sur les dates de semis et la durée du cycle des plantes. Bien d'autres critères peuvent aussi être améliorés par la génétique chez presque toutes les espèces cultivées. Tout en gardant à l'esprit que la protection a un coût et que les mécanismes à mettre en œuvre dépendent des scénarios de sécheresse », résume François Tardieu, qui a dirigé l'étude.

VALORISATION

> Communiqué de presse INRAE

www.inrae.fr/actualites/changement-climatique-il-faut-prendre-compte-faculte-dadaptation-agriculteurs

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Boris Parent, Margot Leclerc, Sébastien Lacube, Mikhail A. Semenov, Claude Welcker, Pierre Martre, François Tardieu. 2018. Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (42) 10642-10647; DOI: 10.1073/pnas.1720716115

(1) Cycle végétatif : période comprise entre la levée et la floraison, pendant laquelle la plante accumule de la biomasse grâce à la photosynthèse.



Contact : François Tardieu

Unité : UMR LEPS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Thèmes : Changements globaux, Agroécologie

Mots clés : Sécheresse, adaptation au changement climatique, impact sur le rendement, maïs



Adapter les régions viticoles au changement climatique en mobilisant la diversité des cépages

Le changement climatique a de nombreux impacts sur l'environnement et l'agriculture, et pourrait menacer la production mondiale de vin. Dans une nouvelle étude parue dans *Proceedings of the National Academy of Sciences*, une équipe internationale, incluant des chercheurs d'INRAE et Bordeaux Sciences Agro*, montre que 56% des régions viticoles du monde pourraient disparaître avec un réchauffement de 2°C, et 85% avec un réchauffement de 4°C. Cependant, l'introduction de plus de diversité de cépages de vigne dans les vignobles pourrait réduire de moitié les pertes potentielles dans les régions viticoles dans le scénario à + 2°C et d'un tiers dans le scénario à +4°C.

CONTEXTE ET ENJEUX

La viticulture, comme d'autres productions agricoles, concentre sa production sur un nombre réduit de variétés de vigne. La diversité au sein des espèces cultivées pourrait être une clé pour rendre l'agriculture plus résiliente face au changement climatique. La vigne est toute indiquée pour tester cette hypothèse car il en existe plus de 1 100 variétés actuellement cultivées et documentées. De plus, la production viticole est très sensible aux changements de température et de saison, ce qui en fait un bon indicateur de l'impact du changement climatique sur l'agriculture.

RÉSULTATS

L'impact du changement climatique étudié sur 11 variétés de cépage

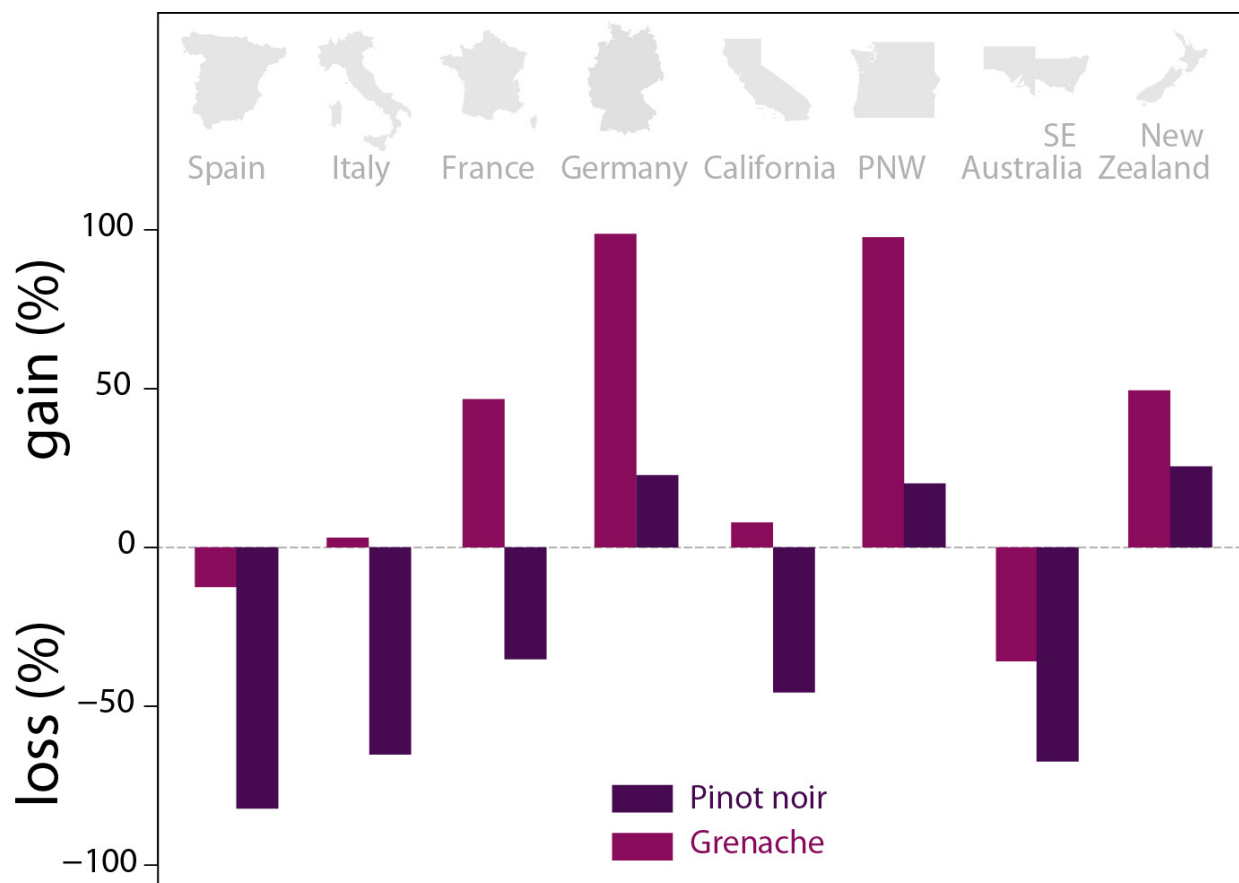
L'étude a exploré l'impact climatique sur 11 variétés de cépage: Cabernet-Sauvignon, Chasselas, Chardonnay, Grenache, Merlot, Mourvèdre, Pinot noir, Riesling, Sauvignon blanc, Syrah et Ugni blanc. Ces variétés représentent 35 % de la superficie plantée dans le monde, et atteignent 64 à 87 % dans de nombreux pays viticoles importants comme l'Australie, le Chili, la France, la Nouvelle-Zélande, la Suisse et les États-Unis.

Ainsi les chercheurs ont développé un modèle permettant de calculer les différents stades de développement de chacune de ces variétés (débourrement¹, floraison et véraison²). Ensuite ils ont appliqué ce modèle à différentes régions viticoles dans le monde en utilisant les données de projection du changement climatique (scénario avec une augmentation moyenne de la température de 2°C en 2050 et 4°C en 2100) pour voir où ces variétés seraient viables. Ces modèles ont été calibrés et validés avec des données issues de plusieurs bases, dont plusieurs développées et entretenues par INRAE (collection des variétés de Vassal-Montpellier, données du portail TEMPO de l'US

AGROCLIM d'Avignon).

La méthodologie développée a permis d'identifier des cépages qui pourraient être plus ou moins favorisés dans les conditions futures. Ainsi, les variétés tardives telles que la Syrah, le Grenache et le Mourvèdre pourraient beaucoup plus se développer dans les régions viticoles actuelles, et en parallèle les variétés précoces telles que le Chasselas, le Pinot noir et le Chardonnay pourraient se répandre dans de nouvelles régions plus septentrionales qui développeraient leurs propres vignobles.

L'étude a aussi permis de quantifier l'évolution des surfaces viticoles pour plusieurs pays. Les pays méditerranéens comme l'Italie ou l'Espagne montrent de nombreuses pertes (environ - 65%), avec très peu de gains (moins de 10 %), tandis que les régions correspondant aux latitudes plus élevées comme la Nouvelle-Zélande ou le nord des Etats-Unis montrent principalement des gains (+20-100% et +15-60% respectivement). Enfin, des pays en zones plus tempérées, comme la France et l'Allemagne, enregistrent autant de pertes que de gains (environ 20%).



Bien comprendre les différentes variétés de vigne pour aider les viticulteurs à s'adapter au changement climatique

Cette recherche montre l'importance de bien comprendre comment les différentes variétés de cépages de vigne vont s'adapter aux évolutions futures, pour aider les viticulteurs à limiter les impacts du changement climatique sur leur exploitation. Cela nécessite des travaux complémentaires sur des variétés minoritaires (autochtones), pour la plupart inconnues du grand public, mais qui, dans certains cas, pourraient être performantes sous le climat futur. Enfin, il est aussi important de sensibiliser les consommateurs à essayer de nouveaux cépages afin que les producteurs puissent diversifier leur production et augmenter leur capacité d'adaptation. Dans certains vignobles d'appellation, cela devra s'accompagner de modifications des règles de production. Plusieurs de ces questions ont été et sont actuellement explorées en France dans le cadre du projet LACCAGE, lancé en 2012 et piloté par INRAE, qui a pour objectif de définir les stratégies d'adaptation du vignoble français au changement climatique.

L'avenir des régions viticoles dépend essentiellement de décisions humaines. A l'échelle locale, l'adaptation des pratiques viticoles et le choix de variétés de vigne adaptées permettront de prévenir, au moins partiellement, la disparition de certains vignobles. Mais à l'échelle mondiale, l'avenir des régions viticoles dépend des décisions politiques et sociétales qui seront prises dans les prochaines années et des émissions de gaz à effet de serre et, par suite, du réchauffement global qui en résultera.

VALORISATION

> Communiqué de presse INRAE

<https://www.inrae.fr/actualites/adapter-regions-viticoles-au-changement-climatique-mobilisant-diversite-cepages>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> I. Morales-Castilla, I. Garcia de Cortazar-Atauri, B. I. Cook, T. Lacombe, A. Parker, C. van Leeuwen, K. A. Nicholas, et E. M. Wolkovich, Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses, Proceedings of the National Academy of Sciences 27 janvier 2020
DOI : <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1906731117>



Contact : Inaki Garcia-De-Cortazar-Atauri

Unité : US AGROCLIM

Départements : AgroEcoSystem, BAP

Centre INRAE : Provence-Alpes-Côte d'azur

Métaprogramme : ACCAF

Thème : Changements globaux

Mots clés : Changement climatique et risques, viticulture, agrobiodiversité



Valoriser la diversité des cépages pour une viticulture adaptée à la sécheresse

L'adaptation de l'agriculture au changement climatique rend nécessaire la sélection de matériel végétal tolérant à la sécheresse. L'objectif de cette étude était de disséquer le caractère « consommation en eau » de trois cépages de vigne (Grenache, Syrah et Sémillon) soumis à des environnements hydriques contraignants, afin d'identifier les caractères qui contribuent le plus aux différences de tolérance à la sécheresse. Notre recherche a démontré que la tolérance à la sécheresse ne peut être décrite avec précision qu'en considérant l'interaction complexe entre de nombreux caractères. Néanmoins, l'un des plus importants est la transpiration maximale au cours de la journée, et ce même en l'absence de stress hydrique. Cela s'explique par le fait que ce caractère détermine la vitesse à laquelle l'eau disponible est consommée. Il est de plus fortement corrélé aux paramètres hydrauliques des feuilles qui permettent à un cépage de tolérer la sécheresse. Par contre, les pertes transpiratoires nocturnes sont faibles et n'augmentent pas les risques de stress hydrique. Cette étude fournit des cibles pour identifier les cépages de la vigne les plus tolérants à la sécheresse.

CONTEXTE ET ENJEUX

La manque d'eau est l'une des principales limitations environnementales auxquelles la viticulture devra faire face dans un futur proche, principalement dans les zones viticoles traditionnelles. Dans les régions où l'eau est limitante et où l'irrigation ne pourrait être mise en oeuvre, la sélection de génotypes plus tolérants à la sécheresse semble une stratégie économique et durable (van Leeuwen et al. 2016). L'identification de génotypes plus tolérants à la sécheresse demande de mieux comprendre les principaux processus physiologiques impliqués. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était de disséquer le caractère « consommation en eau » de trois cépages de vigne (Grenache, Syrah et Sémillon) soumis à des environnements hydriques contraignants, afin d'identifier les caractères qui contribuent le plus aux différences de tolérance à la sécheresse.

RÉSULTATS

Des différences entre cépages ont été mises en évidence pour plusieurs caractères étudiés. Au cours d'une journée, l'utilisation maximale de l'eau est expliquée par les conditions environnementales (déficit de pression de vapeur) et fortement corrélée à certains caractères hydrauliques foliaires (Fig.1). Le Sémillon présente la plus forte transpiration journalière et des feuilles plus résistantes à de faibles potentiels hydriques (ex: stress hydrique). Cependant, des simulations par modélisation démontrent que le Grenache, qui est caractérisé par une utilisation de l'eau plus conservatrice, serait plus performant en cas de sécheresse. Les meilleures performances du Grenache résultent de sa faible consommation en eau pendant la journée, ce qui permet d'économiser l'eau du sol. Ce résultat est cohérent avec les observations faites au vignoble par les producteurs.

Pendant la nuit, les pertes en eau ne dépassent pas 10% de la transpiration diurne pour tous les cépages et n'augmentent pas les risques de stress hydrique. Curieusement, nos résultats suggèrent un lien entre l'utilisation nocturne de l'eau et la productivité, mais les mécanismes restent inconnus.

Pour résumer, les résultats montrent que chez la vigne, la transpiration diurne maximale dépend de plusieurs traits hydrauliques qu'il est important d'intégrer pour caractériser la tolérance à la sécheresse des cépages.

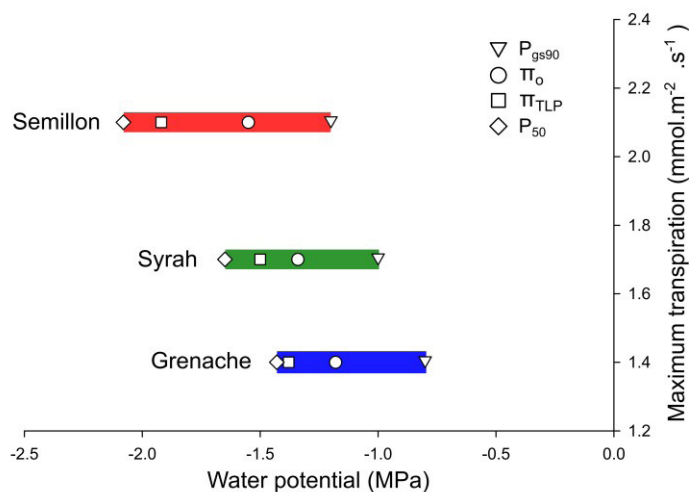


Fig. 1. Relations entre la transpiration maximale de trois cépages dans des conditions bien irriguées et des paramètres hydrauliques des feuilles ; P_{Gc90} , π_0 , π_{TLP} et P_{50} . Les barres colorées illustrent le paramètre HSM P_{50} (Dayer et al., 2020a).

PERSPECTIVES

À l'avenir, nous espérons étendre la caractérisation phénotypique à une plus grande diversité de cépages pour les caractères identifiés comme pertinents dans cette étude afin d'identifier les cépages les plus tolérants à la sécheresse.

VALORISATION

- > Dayer S, Herrera JC, Dai Z, Burlett R, Lamarque LJ, Delzon S, Bortolami G, Cochard H, and Gambetta GA. (2020a). The sequence and thresholds of leaf hydraulic traits underlying grapevine varietal differences in drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* 71(14), 4333–4344. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa186>
- > Dayer S., Gowdy M., van Leeuwen C., Gambetta G.A. (2020b) "Leveraging the grapevine drought response to increase vineyard sustainability". *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.4482>
- > Dayer S, Herrera JC, Dai Z, Burlett R, Lamarque LJ, Delzon S, Bortolami G, Cochard H, and Gambetta GA. (2020c). Nighttime transpiration represents a negligible part of water loss and does not increase the risk of water stress in grapevine. *Plant Cell and Environment* <https://doi.org/10.1111/pce.13923>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

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



Contact : Pr Gregory Gambetta

Unité : EGFV

Départements : AgroEcoSystem, BAP

Centre INRAE : Bordeaux-Nouvelle Aquitaine

Métapogramme : ACCAF

Thèmes : Changements globaux, Agroécologie

Mots clés : Vigne, sécheresse, changement climatique, variabilité génétique



Résistance des arbres aux tempêtes : l'impact de la teneur en eau des sols étudié pour la première fois

La résistance des arbres au déracinement est un élément majeur pour faire face aux dégâts provoqués par le vent en forêt lors des tempêtes. Conséquence du changement climatique, les conditions hydrologiques des sols lors des tempêtes changent en Europe en raison de précipitations plus importantes l'hiver. L'ancrage des arbres dans le sol varie considérablement en fonction des sols, de l'espèce et de l'âge des arbres ; mais l'influence des propriétés du sol avait été peu étudiée. Des chercheurs d'INRAE ont publié le 14 octobre 2020 dans la revue *Forest Ecology and Management* le résultat de 10 années de recherche pour modéliser l'impact de la teneur en eau des sols sur la résistance au vent du Pin maritime. La saturation complète en eau des sols se révèle être un élément clé qui entraîne le déracinement de l'arbre. Une piste à explorer pour la gestion des risques liés aux intempéries et aux dégâts en forêt.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les scientifiques d'INRAE ont mené cette étude pour comprendre le rôle du statut hydrologique du sol sur l'enracinement du Pin maritime dans les sols sableux qui dominent dans le massif landais, en combinant des expérimentations de terrain et de la modélisation. Le massif landais, le plus vaste massif forestier d'Europe de l'Ouest, a été durement touché par les tempêtes hivernales depuis une vingtaine d'années.

Chablis d'un pin maritime d'une trentaine d'année, dégât fréquemment observé dans le massif des Landes après une tempête, et observé ici sur un site expérimental géré par l'Unité expérimentale Forêt-Pierroton d'INRAE
©Pauline Défossez



RÉSULTATS

Un modèle pour simuler la résistance au déracinement en fonction de la teneur en eau des sols

Sur le terrain, les scientifiques ont mesuré la résistance des arbres au cours de tractions allant jusqu'au déracinement complet, et selon des conditions de teneur en eau des sols contrastées. Ils ont réalisé ces expérimentations sur des Pins maritimes âgés de 14 ans. Ils ont ensuite excavé et transféré en laboratoire les systèmes racinaires prélevés pour pouvoir reconstituer leur architecture 3D. Les propriétés hydriques et mécaniques des sols ont également été mesurées en laboratoire pour les différentes couches du sol du site expérimental.

En parallèle, un modèle a été développé pour simuler le renversement d'un arbre selon l'humidification progressive des différentes couches du sol. Ce modèle intègre la distribution 3D des racines de structure dans les différentes couches de sol. L'évolution de la résistance au renversement par le vent a été analysée par simulation, lors de la propagation d'un front de saturation au cours de précipitations intenses d'une part, et lors de la montée de la nappe phréatique liées à une période continue de précipitations d'autre part.

Le point de saturation complète des sols en eau, élément déterminant

Le résultat majeur de cette étude montre que c'est au moment où la saturation complète en eau du sol est atteinte que la résistance au déracinement chute considérablement. Tant que ce point n'est pas atteint, l'augmentation de la teneur en eau du sol ne modifie pas de façon majeure la stabilité de l'arbre au vent. Ceci est dû aux spécificités des sols sableux, dont les forces de cohésion sont principalement liées au phénomène de capillarité entre les grains de sable. Ces résultats devront être étendus à l'avenir à des arbres plus âgés pour lesquels les dégâts de tempêtes sont considérables.

PERSPECTIVES

Ces travaux permettent de mieux comprendre de quelle manière intervient la saturation en eau des sols liée à la pluviométrie hivernale sur la résistance des arbres au déracinement. Dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des précipitations en hiver en Europe de l'Ouest, ces résultats ouvrent des pistes en matière de gestion du risque tempête incluant notamment la surveillance des hauteurs de nappes en hiver.

VALORISATION

Communiqué de presse INRAE

<https://www.inrae.fr/actualites/resistance-arbres-aux-tempetes-limpact-teneur-eau-sols-etudie-premiere-fois>

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Forest Ecology and Management, P.Défossez, G.Veylon, M.Yang, J.M.Bonnefond, D.Garrigou, P.Trichet, F.Danjon - Volume 480, 15 January 2021, 118614 - doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118614



Contact : Pauline Défossez

Unité : UMR ISPA

Départements : AgroEcoSystem, ECODIV

Centre INRAE : Nouvelle-Aquitaine Bordeaux

Thèmes : Changements globaux, Biodiversité

Mots clés : Forêt, tempête, changement climatique, teneur en eau, enracinement, dégât en forêt



Le challenge Global Wheat : une compétition internationale pour automatiser le comptage des épis de blé par analyse d'image

La sélection variétale est un des principaux leviers permettant d'améliorer la production agricole en quantité comme en qualité. Ainsi, combiné avec le génotypage, le phénotypage haut-débit permet d'identifier les gènes associés à des mécanismes éco-physiologiques spécifiques de réponse aux stress biotiques et abiotiques. Les observations de proxidétection, non destructives et régulières, permettent d'accéder à certaines caractéristiques des cultures comme le nombre d'épis qui est une composante essentielle du rendement de cultures de blé, encore évaluée manuellement dans la plupart des essais.

L'UMT CAPTE a été à l'initiative du « global wheat challenge », une compétition scientifique internationale réunissant 2245 équipes et organisée par 9 partenaires dont INRAE et Arvalis Institut du végétal. Ce challenge proposait un jeu de données inédit de 4700 images (le Global Wheat Head Dataset [3]) qui a permis aux participants de développer des modèles d'apprentissage profond. Trois lauréats se sont distingués par les performances de leurs modèles capables de compter automatiquement et précisément les épis de blé dans tout type d'images. Mis à disposition en accès libre, ces algorithmes seront mis en œuvre par INRAE et Arvalis dans leurs infrastructures de phénotypage dès 2021.

CONTEXTE ET ENJEUX

L'amélioration de la production agricole dans un contexte d'optimisation de l'utilisation des ressources pour une agriculture durable passe par une meilleure connaissance du milieu, de son hétérogénéité et par un suivi de l'état des cultures. La sélection variétale est un des principaux leviers permettant d'améliorer cette production en quantité comme en qualité. Combiné avec le génotypage, le phénotypage haut-débit permet d'identifier les gènes associés à des mécanismes éco-physiologiques spécifiques de réponse aux stress biotiques et abiotiques en fournissant des observations de proxidétection, non destructives, et régulières. Parmi ces observations, le nombre d'épis produits par une culture de blé est une composante essentielle du rendement, encore évaluée manuellement dans la plupart des essais de sélection variétale.

Plusieurs travaux ont récemment montré le potentiel des méthodes basées sur des techniques d'apprentissage profond (« deep learning ») pour reconnaître automatiquement des épis dans des images^[1,2]. Cependant, les résultats étaient évalués sur des jeux d'images limités en termes de génotypes, de conditions environnementales (zone géographique, climat, stress,...) et de conditions d'acquisition (type de caméra, orientation, illumination), et ne permettaient pas d'extrapoler efficacement ces méthodes sur de nouveaux jeux de données.

RÉSULTATS

Etienne David, doctorant, Simon Madec et Shouyang Liu, post-doctorants de l'UMT CAPTE, ont été à l'initiative du « global wheat challenge », une compétition scientifique internationale organisée de mai à août 2020 par 9 partenaires dont INRAE et Arvalis Institut du végétal. L'objectif de cette compétition était d'obtenir un modèle d'apprentissage profond capable de compter automatiquement les épis de blés d'une large diversité génétique dans des images à haute résolution. Elle a récompensé les trois meilleures équipes parmi 2245 qui ont proposé les modèles les plus performants grâce au mécénat d'HIPHEN (entreprise partenaire de l'UMT CAPTE) et de #DIGITAG (Institut de Convergence en Agriculture Numérique). Ce challenge s'appuie sur le Global Wheat Head Dataset^[3] qui rassemble 4700 images acquises dans des zones géographiques et avec des systèmes d'acquisition variés.

Ces images ont été annotées au préalable, chaque épi étant manuellement identifié par un expert. Les participants ont étalonné leurs

modèles sur les trois quart des images venant d'Europe et du Canada. L'équipe organisatrice a ensuite évalué leurs performances de manière indépendante sur le quart restant constitué d'images provenant du Japon, de la Chine et d'Australie. Outre la forte implication des trois principaux partenaires de l'UMT CAPTE (INRAE, Arvalis et HIPHEN), l'équipe technique de l'UMR EMMAH s'est aussi mobilisée pendant la période de confinement. Au total, l'UMT a annoté 1200 images, et revu et corrigé a posteriori les annotations des 4700 images du jeu de données.

PERSPECTIVES

Le modèle proposé par l'équipe gagnante sera mis en œuvre dans la plateforme 4P (Plant Phenotyping Processing Platform) développée dans le cadre du projet Phenome pour traiter automatiquement les données de phénotypage au champ acquises dans les installations d'INRAE.

VALORISATION

Le jeu de données « Global Wheat Head Detection » est publié et en accès libre ^[3]. Un webinaire d'E. David (Arvalis) et A. Comar (HIPHEN) présente le challenge.

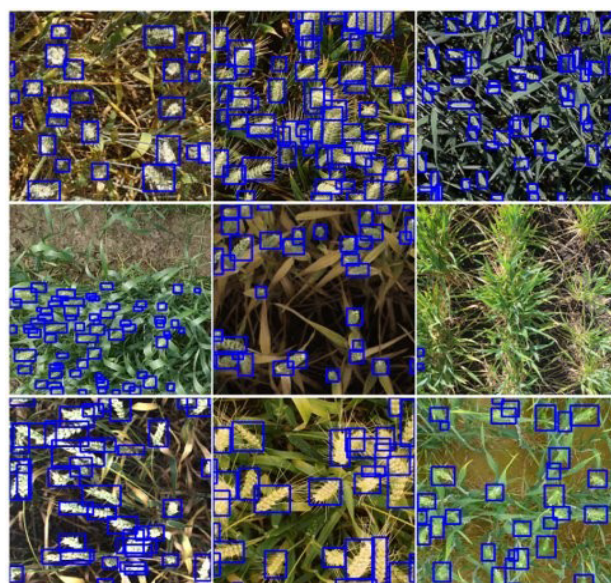
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Global Wheat Challenge : www.global-wheat.com
- > www.global-wheat.com/2020-challenge

[1] Madec, S.; Jin, X.; Lu, H.; De Solan, B.; Liu, S.; Duyme, F.; Heritier, E.; Baret, F. Ear density estimation from high resolution rgb imagery using deep learning technique. *Agricultural and Forest Meteorology* 2019, 264, 225-234.

[2] Hasan, M.M.; Chopin, J.P.; Laga, H.; Miklavcic, S.J. Detection and analysis of wheat spikes using convolutional neural networks. *Plant Methods* 2018, 14, 100.

[3] David, E.; Madec, S.; Sadeghi-Tehran, P.; Aasen, H.; Zheng, B.; Liu, S.; Kirchgessner, N.; Ishikawa, G.; Nagasawa, K.; Badhon, M.A., et al. Global wheat head detection (gwhd) dataset: A large and diverse dataset of high-resolution rgb-labelled images to develop and benchmark wheat head detection methods. *Plant Phenomics* 2020, 2020, 3521852.



Extrait d'images annotées pour le Global Wheat Head Dataset illustrant la variété des situations représentées dans ce jeu de donnée. Auteur : E. David, ©UMT CAPTE



Contact : Frédéric Baret

Unité : EMMAH

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Provence-Alpes-Côte d'azur

Thèmes : Agroécologie, Changements globaux

Mots clés : Phénotypage, proxidétection, analyse d'image, modèles d'apprentissage profond



Le RMQS a 20 ans !

Les premiers sites du Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) ont été mis en place dans le Loiret en 2000. En 2020, le RMQS fête donc ses 20 ans ! A cette occasion, l'unité InfoSol a organisé un événement pour réunir l'ensemble des acteurs ayant contribué à ce réseau depuis son démarrage. Cet événement s'est tenu le 6 février après-midi sur le site du Centre INRAE Val de Loire à Orléans¹. Cette demi-journée a fait une rétrospective² sur la naissance de ce programme national et a mis en avant les principales avancées scientifiques auxquelles il a contribué et, au regard des enjeux actuels concernant les sols (contamination et santé, biodiversité, carbone et changement climatique) elle a présenté les attentes et les perspectives pour ce réseau dans les années futures. Une centaine de participants d'origines diverses étaient présents : partenaires régionaux de terrain, représentants du Gis Sol et d'INRAE, scientifiques ayant contribué au programme, anciens collaborateurs, membres de l'équipe projet actuelle, etc. Ils ont tous salué le chemin parcouru depuis le démarrage du programme, la ténacité dont ont fait preuve tous ses acteurs pour maintenir un tel projet dans la durée. Ils ont souligné le rôle essentiel que joue désormais le RMQS pour répondre aux grands enjeux actuels et futurs concernant les sols.

CONTEXTE ET ENJEU

Extraordinairement diversifiés et sources d'une biodiversité considérable, les sols jouent un rôle déterminant comme support de la production d'aliments et de biomasse, régulateur du cycle et de la qualité de l'eau, milieu permettant le recyclage et l'accumulation du carbone contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique, contributeur majeur à la biodiversité, source de matériaux de construction, élément constitutif de la valeur esthétique des paysages. Fragiles et menacés, les sols sont un patrimoine naturel non renouvelable à l'échelle humaine, soumis à de nombreux risques de dégradation. L'érosion, la contamination, l'artificialisation, la baisse du taux de matières organiques, la perte de biodiversité sont les principales dégradations des sols liées aux activités humaines. Depuis vingt ans, le RMQS répond aux objectifs d'évaluation et de suivi à long terme des sols de France³ afin de fournir des données permettant d'aider à protéger les sols et à maintenir leurs qualités.

RÉSULTATS

Ce réseau comprend 2240 sites répartis selon un maillage régulier couvrant l'ensemble du territoire français, métropole et outre-mer. Qu'ils soient en zones rurales, forêts, villes ou montagnes, des prélèvements d'échantillons de sols, des observations et des mesures sont effectués tous les quinze ans sur chaque site. Ce programme national, financé par le Groupement d'intérêt scientifique Sol, est coordonné par INRAE (unité InfoSol) et l'IRD (outre-mer), et mis en œuvre par des partenaires régionaux variés et très investis. La première campagne

s'est déroulée de 2000 à 2015, la seconde a débuté en 2016 et devrait se terminer en 2030. Entre les deux campagnes, la stratégie d'échantillonnage a été révisée afin d'améliorer la capacité du réseau à détecter des évolutions des propriétés des sols. Le RMQS réseau fournit des informations sur la distribution spatiales des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Il a contribué depuis son lancement à de nombreuses avancées scientifiques, sur des enjeux importants. Il a ainsi permis de qualifier la fertilité des sols, leur contamination en éléments traces métalliques et en polluants organiques persistants, d'estimer les stocks de carbone des sols ou encore de cartographier la biodiversité des communautés microbiennes des sols. Les principaux paramètres mesurés durant la première campagne seront reconduits durant la nouvelle campagne afin d'analyser l'évolution des sols. De nouveaux paramètres ont été ajoutés au menu de routine afin de mieux évaluer la sensibilité des sols dans le contexte de changement climatique (réserve utile, matières organiques particulières, stocks de carbone profonds). Le suivi des produits phytosanitaires et des autres composants de la biodiversité des sols (faune, flore et fonge) sont en cours de test avec l'objectif d'élargir l'éventail des propriétés des sols suivi par le RMQS.

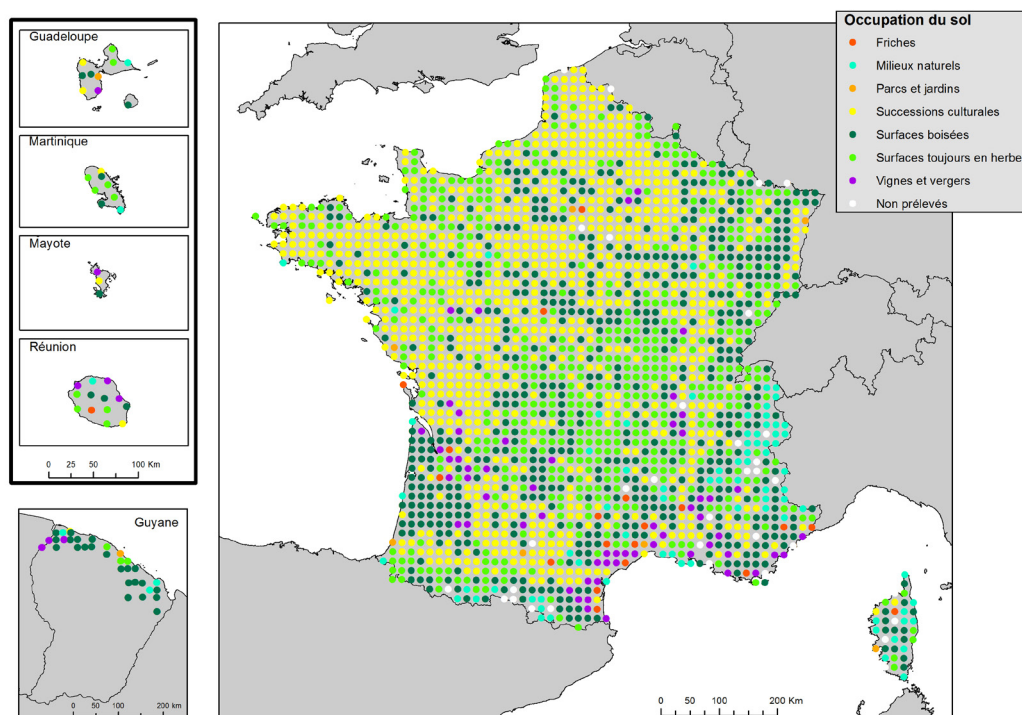
PERSPECTIVES

À l'avenir, le RMQS fournira les données pour estimer la dynamique du stock de carbone des sols et du réservoir en eau utilisable, paramètres essentiels dans le contexte de changement climatique. Il permettra d'évaluer les liens entre la contamination des sols et la santé humaine et de suivre l'évolution de la biodiversité des sols. Grâce aux efforts considérables déployés depuis vingt ans par ses partenaires techniques, scientifiques et financiers, le RMQS constitue un dispositif de référence sur le sol, pour aujourd'hui et les générations futures, au service de la recherche, des politiques publiques et des acteurs économiques. Ce dispositif, par la richesse des données, figure au premier rang des recherches nationales, européennes et internationales sur les sols.

VALORISATION

Le RMQS est à l'origine de la principale base de données nationale sur les sols français, qui a permis la publication de plus de 130 publications de rang A. Il a permis la construction du Conservatoire européen des échantillons de sols qui met des milliers d'échantillons de sol du RMQS à disposition d'équipes de recherche françaises et européennes. Grâce à ses données et à ses échantillons, le RMQS a contribué à des dizaines de projets de recherche français ou européens. Ce programme vient en appui aux politiques publiques de la France vis-à-vis de la gestion durable des sols. Les données sont utilisées par l'INERIS dans le cadre de l'évaluation de l'exposition de la population aux contaminants⁴. Elles servent aux rapports européens sur la dynamique des stocks de carbone des sols en lien avec le changement climatique. Les données de la 2^{ème} campagne sont très attendues pour répondre à l'initiative 4pour1000 « Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » lancée lors de la COP21. La carte mondiale des stocks de carbone publiée en 2018 par la FAO⁵ et l'Atlas français des bactéries du sol⁶, publié en 2019, s'appuient directement sur les données et les échantillons du RMQS.

*Carte « mondiale » des sites RMQS
(répartition et occupation du sol observée
durant la première campagne)*



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > 1 <http://www.gissol.fr/evenements/le-rmq-s-a-20-ans-5008>
- > 2 Webinaire de l'AFES (06/05/20) Le RMQS a 20 ans ! <https://vimeo.com/channels/webinairesafes/416049027>
- > 3 <http://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq-s-34>
- > 4 <https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/tous-dossiers-thematiques/inegalites-environnementales>
- > 5 <http://www.fao.org/news/story/fr/item/1071080/icode/>
- > 6 <https://leclub-biotope.com/fr/librairie-naturaliste/1076-atlas-francais-des-bacteries-du-sol>



Contact : Claudy Jolivet

Unité : US InfoSol

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Val-de-Loire

Thèmes : Agroécologie, Biodiversité, Changement globaux, Ressources et bioéconomie, Alimentation, Santé globale, Société et territoires

Mots clés : Sol, qualité, suivi à long terme, monitoring



Participation à l'écriture du « Global Soil Biodiversity Report » de la FAO

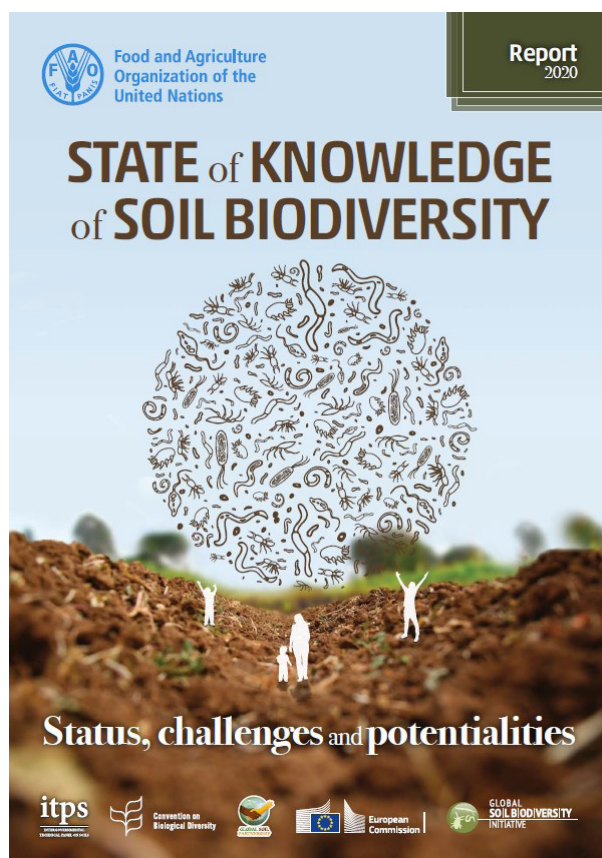
Le rapport publié en mai 2019 par la Plateforme Intergouvernementale sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques (IPBES) évaluait qu'environ 1 million d'espèces animales et végétales sont aujourd'hui menacées d'extinction ; qu'en est-il concernant la biodiversité du sol ? Cette question avait également été abordée lors de la réunion de la Conférence des Parties COP14 à Sharm El-Sheikh en Egypte en 2018. C'est ainsi qu'un rapport sur l'état des connaissances sur la biodiversité des sols a été mandaté par la Convention sur la Diversité Biologique des Nations Unies (UN CBD). A travers le Laboratoire Sols et Environnement (LSE) et l'unité EMMAH, INRAE a participé à la co-écriture de ce premier rapport mondial, intitulé "State of Knowledge on Soil Biodiversity: Status, Challenges, and Potentialities" aux côtés de L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et d'une centaine de spécialistes mondiaux. Ce rapport a été rendu public en cette fin d'année 2020 en lien avec la journée mondiale des sols célébrée le 5 décembre, et servira de support à la 24^{ème} rencontre de l'Organe subsidiaire de l'UN CBD chargé de fournir des avis scientifiques, techniques et technologiques (SBSTTA) dans le but d'établir des recommandations pour la prochaine Conférence des Parties COP15 à Kunming en Chine repoussée en 2021.

CONTEXTE ET ENJEUX

La Convention sur la Diversité Biologique des Nations Unies (UN CBD) créée en 1992 lors du « Sommet de la Terre » à Rio, est un traité international juridiquement contraignant qui a pour but d'encourager des mesures en faveur de la conservation de la diversité biologique (e.g. ressources génétiques, espèces et écosystèmes). L'organe directeur de cette convention est la Conférence des Parties (COP) réunissant tous les deux ans, 196 Parties pour évaluer les progrès accomplis et établir des priorités et des plans de travail pour les années futures. Lors de la COP14 qui a eu lieu à Sharm El-Sheikh en Egypte en 2018, un rapport sur la biodiversité des sols a été mandaté à l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) afin de faire un bilan des connaissances sur la biodiversité des sols à l'échelle mondiale. Un appel à participation à l'écriture avait été lancé à l'été 2019 par le Global Soil Biodiversity Initiative. Le Laboratoire Sols et Environnement et l'unité EMMAH ont ainsi participé à la co-écriture de 3 chapitres sur les 6 proposés dans ce premier rapport mondial.

RÉSULTATS

Ce rapport d'un volume d'environ 600 pages, intitulé "State of Knowledge on Soil Biodiversity: Status, Challenges, and Potentialities" co-écrit par une centaine de spécialistes mondiaux, est constitué de 6 chapitres qui décrivent les différents groupes d'organismes appartenant à la biodiversité des sols, leurs contributions dans le fonctionnement des écosystèmes et leur capacité à rendre des services écosystémiques à l'humanité, les menaces qui pèsent sur cette biodiversité, ainsi que des propositions d'actions en faveur de sa conservation. Enfin, un chapitre traite de l'état des connaissances de la biodiversité des sols dans différents pays. Malgré l'accumulation croissante des connaissances depuis ces dix dernières années sur la biodiversité des sols grâce particulièrement à des développements technologiques, il est clair que des lacunes importantes demeurent. Il est par exemple encore difficile de relier



biodiversité des sols et fonctionnement des écosystèmes, ou de prévoir les conséquences réelles de la perte de biodiversité des sols pour l'humanité. La mise en œuvre de politiques efficaces et de stratégies de gestion durable des sols pourrait aider à la conservation de cette biodiversité fonctionnelle. Finalement il reste souhaitable de ne pas se restreindre qu'à la partie visible de la biodiversité dans la protection des écosystèmes terrestres ; la composante majeure que constitue la partie invisible, car souterraine de leur biodiversité, c'est-à-dire celle des sols, doit nécessairement être prise en compte.

PERSPECTIVES

Ce rapport a pour ambition d'apporter des connaissances scientifiques afin d'appuyer des politiques liées à la conservation de la biodiversité des sols à différentes échelles spatiales, et de donner des pistes de recherche.

VALORISATION

> www.fao.org/documents/card/fr/c/cb1928en/



Contacts : Apolline Auclerc & Céline Pélosi

Unités : UMR LSE INRAE-Université de Lorraine
& UMR EMMAH INRAE-Avignon Université

Département : AgroEcoSystem

Centres INRAE : Grand Est - Nancy & PACA

Mots clés : Sol, biodiversité, organisme du sol, services écosystémiques, préservation de l'écosystème, objectifs de développement durable, bulletin, sensibilisation



Contamination des sols et des vers de terre par les pesticides : une menace silencieuse

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 les processus écologiques. Dans le cadre du projet RESCAPE (RESistance of agricultural landSCAPEs to pesticide transfers in soils and living organisms, Programme Ecophyto 2014), l'analyse de 31 pesticides couramment utilisés en grandes cultures en France a révélé la présence d'au moins un pesticide dans 100% des sols et 92% des vers de terre analysés, aussi bien dans les cultures traitées que dans les habitats non traités (haies, prairies et parcelles en céréales en agriculture biologique). Des « cocktails » d'insecticides, herbicides et fongicides contaminaient 90% des sols et 54% des vers de terre à des niveaux qui pourraient mettre en danger ces organismes bénéfiques du sol. Un risque élevé de toxicité chronique, pouvant impacter la reproduction des vers de terre, a été mis en évidence pour 46% des échantillons, à la fois dans les parcelles de céréales traitées et dans les habitats non traités considérés comme des zones refuges. Ces résultats fournissent des informations essentielles pour orienter la réglementation relative à l'utilisation des pesticides dans le cadre de la transition agroécologique.

CONTEXTE ET ENJEUX

Environ 500 ingrédients actifs sont actuellement présents dans plusieurs milliers de produits phytosanitaires utilisés dans l'Union européenne (European Commission, 2020). Malgré les précautions prises par les agriculteurs lors de l'application des pesticides, ces derniers sont disséminés dans l'environnement par dérive de pulvérisation, volatilisation, infiltration et ruissellement depuis les zones traitées (Mottes et al., 2014). L'évaluation de la contamination des différents milieux (air, eau, sol), des organismes non cibles des pesticides et des effets indésirables sur l'environnement sont un prérequis pour une gestion plus durable des paysages agricoles.

RÉSULTATS

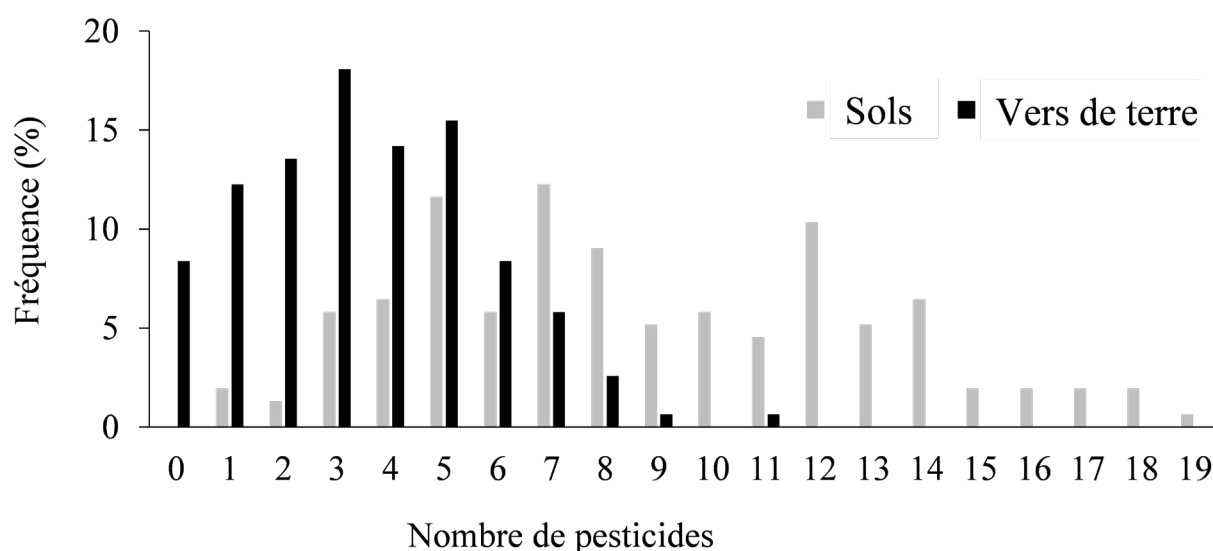
Trente-et-un pesticides couramment utilisés en grande culture ont été analysés dans des sols et des vers de terre prélevés sur la Zone Atelier « Plaine & Val de Sèvre ». 100% des sols et 92% des vers de terre échantillonnés dans des parcelles conduites en agriculture conventionnelle, mais également dans des parcelles en agriculture biologique ou dans des habitats semi-naturels, contenaient au moins un pesticide. Bien qu'un plus grand nombre de molécules et des concentrations plus élevées aient été trouvés dans les zones traitées, une contamination quasi-systématique par un mélange de trois pesticides a été détectée : l'insecticide imidaclopride, l'herbicide diflufenican et le fongicide époxiconazole, des molécules couramment utilisées en grandes cultures céréalières. Un risque élevé pour la reproduction des vers de terre lié à ces mélanges de pesticides a été mis en évidence dans 46% des cas. 12% des sols présentant un risque de toxicité

chronique pouvant affecter la reproduction des vers de terre provenaient de zones couvertes par des haies. L'époxiconazole, un fongicide relativement préoccupant de la famille des triazoles, a également été mesuré à des concentrations toxiques pour la reproduction des vers de terre dans plusieurs prairies et parcelles de céréales biologiques.

Les résultats suggèrent pour plusieurs molécules une bioaccumulation dans les organismes et une persistance environnementale plus fortes qu'attendues. Si les zones non traitées ne sont pas exemptes de pesticides, les habitats semi-naturels (prairies et haies) et les parcelles en agriculture biologique restent tout de même dans la plupart des cas moins contaminées que les parcelles « cibles » des pesticides. Ces zones pourraient ainsi servir de refuges aux organismes dans les paysages agricoles, ce qui met en lumière l'importance de maintenir ces infrastructures agroécologiques dans les paysages agricoles.



Ver de terre Allolobophora chlorotica prélevé pour analyse © C. Pelosi



Fréquence du nombre de pesticides (toutes classes confondues) par échantillon de sol et par ver de terre

PERSPECTIVES

La contamination d'autres groupes d'organismes non cibles (carabes, micromammifères) par ces pesticides est actuellement à l'étude. Les résultats, qui seront prochainement publiés, confortent ceux obtenus sur les sols et les vers de terre quant à l'ubiquité de la contamination et les molécules les plus retrouvées et les plus préoccupantes d'un point de vue écotoxicologique. Dans un projet compagnon (projet PING ; Pratiques agricoles, INteractions avec le paysage et exposition de la faune au Glyphosate : une approche écotoxicologique et socio-économique, Métaprogramme SMaCH) nous avons également recherché la présence de glyphosate et de ses métabolites dans les paysages et les organismes non cibles. L'ensemble des résultats issus de ces projets et d'autres réalisations en cours permettra d'orienter les politiques publiques sur l'évaluation du risque et l'utilisation des pesticides dans les années à venir. En particulier, ces données pourraient aider à légiférer (ex. autorisation de mise sur le marché, doses recommandées) sur certaines molécules considérées comme à risque pour les milieux et la biodiversité.

VALORISATION

Articles publiés :

- > Pelosi C., Bertrand C., Daniele G., Coeurdassier M., Benoit P., Nélieu S., Lafay F., Bretagnolle V., Gaba S., Vulliet E., Fritsch C. 2021. Residues of currently used pesticides in soils and earthworms: a silent threat? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 305, 107167. DOI10.1016/j.agee.2020.107167
- > Daniele G., Lafay F., Pelosi C., Fritsch C., Vulliet E., 2018. Development of a method for the simultaneous determination of multi-class pesticides in earthworms by liquid chromatography coupled to tandem electrospray-mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410 (20), 5009-5018
- > Daniele G., Fieu M., Pelosi C., Fritsch C., Vulliet E. Ultrasounds-assisted extraction coupled with salting-out solvent extraction for determination of pesticides at trace levels in soil. *Journal of Chromatography A*

Communications vers le grand public :

- > Des niveaux alarmants de pesticides dans les sols - Une étude montre une large contamination de l'environnement, où plusieurs produits s'accumulent. *Le Monde*, 30 octobre 2020
- > Des pesticides retrouvés partout dans l'environnement, même dans les vers de terre. Site internet Sciences et avenir, 2 novembre 2020
- > Vers de terre : une étude alerte sur l'impact des pesticides, *Leblob.fr*, 6 novembre 2020 https://www.youtube.com/watch?v=kZaOokyLqic&feature=emb_logo

Article de vulgarisation scientifique :

- > «La biodiversité a du plomb dans l'aile». Journal «En Direct - le journal de la recherche et du transfert de l'arc jurassien». Mai-juin 2019
- > La menace silencieuse de la contamination des sols et des vers de terre par les pesticides. *Life Sciences Université Paris-Saclay*, 5 novembre 2020 <https://www.scoop.it/topic/life-sci-news-upsaclay>

Communications dans des congrès :

- > Pelosi C., Bertrand C., Bonthoux S., Daniele G., Lafay F., Vulliet E., Bretagnolle V., Fritsch C. Earthworm exposure to pesticides in agricultural landscapes. SETAC Europe 14th Special Science Symposium, Brussels, 19-20 novembre 2019 (poster)
- > Bertrand, C., Daniele, G., Lafay, F., Vulliet, E., Bretagnolle, V., Zagatti, P., Pelosi, C., Fritsch, C. Exposition des sols agricoles et d'organismes non cibles aux pesticides : quelle influence de la mosaïque paysagère ? 49e congrès du Groupe Français de recherche sur les Pesticides, 21-24 mai 2019, Montpellier (poster)
- > Daniele G., Lafay F., Pelosi C., Fritsch C., Bretagnolle V., Vulliet E. Développement d'une méthode multi-résidus par LC-MS/MS pour la quantification de traces de pesticides dans les vers de terre. 47ème congrès du Groupe Français des Pesticides, Nancy, 15-18 mai 2017 (communication orale)

Fiche thématique :

- > Fiche thématique N°19 - Décembre 2019, bulletin veille réseau ECOTOX INRAE. L'écotoxicologie dans les paysages agricoles... ou comment l'exposition de l'habitat aux pesticides renseigne des risques potentiels pour les organismes ? C. Pelosi, C. Fritsch, C. Bertrand

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > European Commission, 2020. EU-pesticides-database (2020) <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/public/?event=activesubstance.selection&language=EN> (2020)
- > Mottes, C., Lesueur-Jannoyer, M., Le Bail, M., Mal'ézieux, E., 2014. Pesticide transfer models in crop and watershed systems: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 229-250



Contacts : Céline Pelosi, Colette Bertrand, Clémentine Fritsch

Unités : UMR EMMAH, UMR ECOSYS, UMR Chrono-Environnement

Départements : AgroEcoSystem, ECODIV

Centres INRAE : Provence-Alpes-Côte d'azur, Ile de France - Versailles-Grignon

Thèmes : Santé globale, Agroécologie

Mots clés : Systèmes agricoles, pesticides, biodiversité fonctionnelle, contamination, exposition, risques



La réduction de la diversité microbienne du sol augmente les émissions cumulées de composés organiques volatils et diminue leur diversité

Les microorganismes présents dans le sol sont connus pour être une source et un puits de composés organiques volatils (COV). Le rôle des COV dans la régulation de l'écosystème du sol est aujourd'hui reconnu. Il a par exemple été démontré que la bactérie rhizosphérique *Pseudomonas donghuensis* émet un cocktail de COV qui bloque le développement des champignons et oomycètes pathogènes. Néanmoins, on sait peu de choses sur l'influence de la structure et la diversité des communautés microbiennes du sol sur la diversité des émissions de COV. Cette nouvelle étude a analysé l'effet de la réduction de la diversité microbienne des sols sur les émissions de COV. Nous avons constaté que la réduction des niveaux de diversité microbienne dans le sol augmentait les émissions de COV, tandis que le nombre de COV différents diminuait. En outre, nous avons constaté que l'abondance de certains phyla procaryotes tels que les Proteobacteria et les Bacteroidetes ainsi que la plupart des phyla fongiques ciblés étaient corrélées positivement aux émissions de COV. A l'inverse, d'autres phyla procaryotes comme les Planctomycetes, les Acidobacteria, étaient, eux, négativement ou peu corrélés aux émissions de COV. Nos résultats suggèrent donc que certains phyla microbiens (Proteobacteria, Bacteroidetes) et la plupart des phyla fongiques sont des producteurs de COV tandis que d'autres sont des consommateurs.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les composés organiques volatils (COV) d'origine biologique sont émis en grande majorité par la biomasse aérienne des plantes. Ils sont connus comme précurseurs de composés atmosphériques dangereux pour la santé et l'environnement (ozone, aérosols). Souvent, les flux de COV émis par le sol ne sont pas considérés dans les inventaires d'émissions. Plusieurs études récentes ont toutefois montré que les COV provenant du sol pouvaient être sous-estimés. C'est vrai notamment pour le méthanol dont les émissions par le sol nu sont du même niveau que celles d'un couvert végétal dans une culture de maïs, de blé ou de colza. Les émissions de COV par le sol dépendent des apports de matière organique, mais aussi de la composition de la communauté microbienne qui peut être une source ou un puits de COV.

RÉSULTATS

Nous avons manipulé la diversité microbienne de sols préalablement stérilisés pour quatre sols recevant des apports de produits résiduels organiques depuis 20 ans, sur l'observatoire QualiAgro. Les COV ont été mesurés par un spectromètre de masse à transfert de proton de grande sensibilité du service ANAEE-France. Cet instrument permet de mesurer simultanément des milliers de COV à des concentrations molaires de 1 par trillion. Ces mesures montrent que la réduction de la diversité microbienne dans le sol a augmenté la quantité totale de COV émis tout en diminuant le nombre de ces COV. Ces travaux suggèrent aussi fortement qu'il y a plus de procaryotes qui absorbent les COV que ceux qui en émettent dans le sol. Plusieurs voies de production de COV par les métabolismes primaire et secondaire microbiens des sols permettent d'expliquer cette réponse. Notre étude suggère que les phyla de protéobactéries et de bacteroidètes seraient une source de COV dans les sols alors que les autres phyla seraient principalement des puits. Les émissions de COV de ces phyla pourraient

être expliqués par le métabolisme intense de ces organismes prompts à coloniser le sol. Par ailleurs, notre étude montre que les sols à faible biodiversité émettent jusqu'à 6 fois plus de COV aux propriétés anti-fongiques, comme le diméthyl-sulfide ou le cumène, que les sols à forte biodiversité. Ceci semble indiquer un processus de défense anti-fongique de la part des phyla de protéobactéries et de bacteroidètes.

PERSPECTIVES

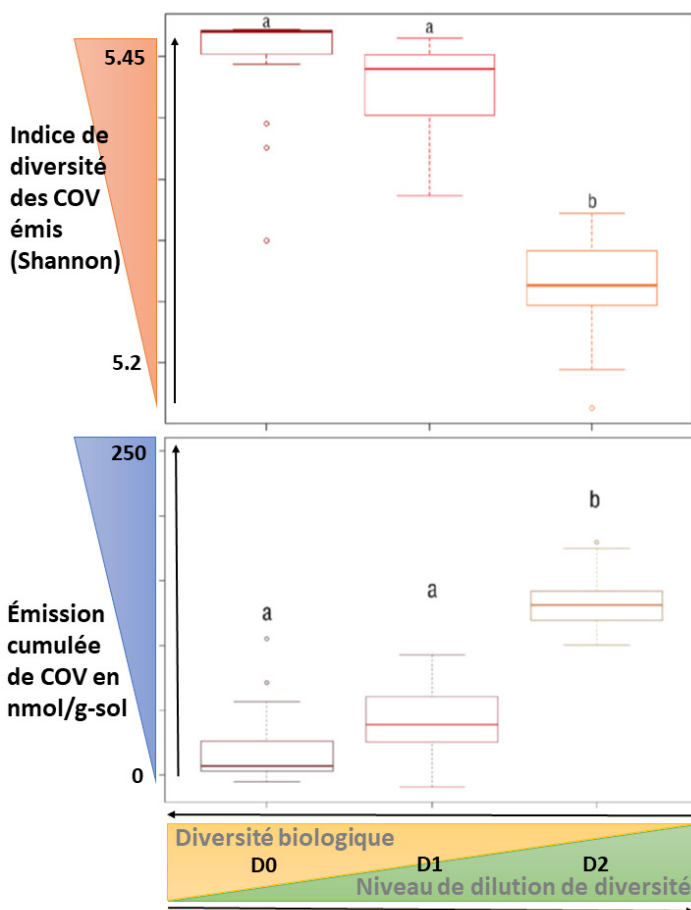
Les corrélations observées entre quantités de phylas et COV émis n'a pas permis d'établir un lien de causalité explicite. Il serait intéressant de réaliser des expérimentations en exposant des sols manipulés au volatilome émis par d'autres sols pour différencier les effets induits par les COV des autres effets. Ce travail a par ailleurs initié un projet ADEME coordonné par Raia Massad (COVEA, 2020-2023) qui explore les émissions de COV d'origine biologique par les sols à une plus large échelle en ajoutant une composante de modélisation dans le but de quantifier ces émissions à des échelles plus larges pour notamment évaluer les implications en termes de pollution de l'air.

VALORISATION

Projet COVEA mentionné ci-dessus.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Abis, L., Loubet, B., Ciuraru, R., Lafouge, F., Houot, S., Nowak, V., Tripied, J., Dequiedt, S., Maron, P. A., and Sadet-Bourgeteau, S.: Reduced microbial diversity induces larger volatile organic compound emissions from soils, Sci Rep, 10, 6104, 10.1038/s41598-020-63091-8, 2020



Emissions cumulée et diversité des COV émis en fonction du niveau de dilution de diversité



Contacts : Benjamin Loubet, Sophie Bourgeteau-Sadet

Unités : UMR ECOSYS, UMR Agroécologie

Département : AgroEcoSystem

Centres INRAE : Ile de France - Versailles-Grignon, Bourgogne-Franche-Comté

Thèmes : Biodiversité, Santé globale

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



Les paillis au cœur des échanges sol-atmosphère en systèmes sans travail du sol

La présence de paillis de résidus de culture à la surface des sols en parcelles sans travail du sol affecte les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols sous-jacents mais leurs effets sont peu étudiés et connus. Dans le cadre d'échanges portés par le programme « sciences sans frontière », l'UMR FARE et l'Université Fédérale de Santa Maria (UFSM, Brésil), ont exploré les effets de la masse, des caractéristiques physiques et chimiques des paillis de blé, de vesce et de canne à sucre, sur leur dégradation ainsi que les flux d'eau, de carbone et d'azote dans le sol et les émissions gazeuses qui y sont associés. Des interactions fortes entre paillis et dynamique de l'eau, dans les paillis et dans les sols (absorption, rétention, évaporation) ont été montrées. L'humidité de l'ensemble sol-paillis a contrôlé le processus de décomposition et la disponibilité de l'azote minéral. L'étude des mécanismes impliqués a permis d'explicitier les relations observées entre présence de paillis et émissions d'ammoniac (polluant atmosphérique) et de protoxyde d'azote (gaz à effet de serre). Ces résultats expérimentaux permettent d'améliorer la représentation des paillis dans les modèles de culture, et la prédiction de leur décomposition et de leurs impacts environnementaux.

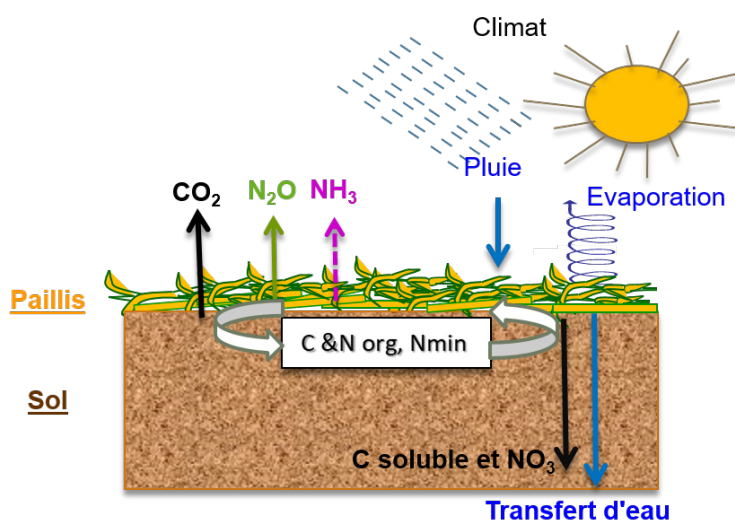
CONTEXTE ET ENJEUX

Ces travaux ont été développés dans le cadre d'une collaboration entre la France (INRAE FARE) et le Brésil, autour du développement des systèmes de culture sans travail du sol, et en agriculture de conservation. La présence des paillis de résidus de culture à la surface des sols modifie le fonctionnement physique, le fonctionnement biologique et les flux de nutriments dans les sols, ces interactions et l'impact de la nature et la masse des paillis ont été peu étudiés. Ces questions s'avèrent pourtant cruciales dans le contexte de l'évolution des systèmes de culture et l'évolution de la gestion des biomasses végétales (exportation ou recyclage), nécessitant l'analyse des compromis associés à ces pratiques.

RÉSULTATS

Deux facteurs principaux ont été étudiés : i) la masse de paillis qui varie selon la culture, les techniques de récolte et l'exportation des résidus ; ii) la nature des résidus : les paillis de canne à sucre, de blé et de vesce, la vesce étant un couvert d'interculture à forte teneur en composés solubles et en azote.

Pour la première fois, l'existence de gradients de décomposition au sein de ces paillis a été démontrée grâce à l'étude fine de la cinétique de décomposition au sein de paillis d'épaisseur croissante. La décomposition des paillis s'est aussi manifestée par une activité microbienne très intense, d'autant plus forte et rapide que la masse était élevée et le résidu immature (vesce > blé = canne à sucre). L'interaction entre ces différents processus et l'effet de la présence du paillis sur la teneur en eau du sol, explique



Représentation schématique des interactions sol-paillis
©S. Recous 2020

des émissions de N_2O , croissantes lorsque la masse de paillis augmente. Enfin, en présence de fertilisation azotée sous forme d'urée en plantation de canne à sucre, le rôle de barrière physique exercé par les paillis, au transport et à la diffusion de l'azote vers le sol, a contribué à augmenter les émissions d'ammoniac par volatilisation.

PERSPECTIVES

La poursuite de la collaboration entre les équipes INRAE (FARE et BioEcoAgro) et l'UFSM au Brésil (Prof. SJ Giacomini, Département des sols) a pour objectif d'améliorer le module MULCH du modèle de culture STICS. Elle associera aussi au sein d'une collaboration des équipes du CIRAD (AIDA, Recyclage et Risque).

*Dispositif d'enceintes statiques
pour mesure du N_2O émis par les paillis
dans un champ de canne à sucre
(Station expérimentale UFSM)
© Dr Patrick Pinheiro*

VALORISATION

Ces travaux ont fait l'objet de trois thèses coencadrées entre UFSM (Pr. SJ Giacomini) et FARE (S. Recous), de séjours en France des doctorants (R. Schmatz, 2016, P. Pinheiro, 2018, B. Chaves, 2020), de 4 mois de séjour à UFSM de S. Recous, et de plusieurs publications internationales, notamment dans les journaux Atmospheric Environment, Biology and Fertility of Soils, Soil and Tillage Research, Geoderma. Ils ont également été présentés dans plusieurs conférences internationales : Soil Organic Matter Conference (Rothamsted, Royaume-Uni, 2017), 20th international N workshop (Rennes, 2018), 4p1000 initiative (Poitiers, 2019), STICS model workshop (Montpellier, 2020).



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > R. Schmatz, S. Recous, D. A. Weiler, G. E. Pilecco, A. L. Schu, R. L. Giovelli, S.J. Giacomini (2020) How the mass and quality of wheat and vetch mulches affect drivers of soil N_2O emissions, Geoderma, 372, 114395, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114395>
- > G. Dietrich, S. Recous, P. L. Pinheiro, D. A. Weiler, A. L. Schu, M.R.L. Rambo, S.J. Giacomini (2019) Gradient of decomposition in sugarcane mulches of various thicknesses. Soil and Tillage Research, 192, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.022>
- > P.L. Pinheiro, S. Recous, G. Dietrich, D.A. Weiler, A.L. Schu, H.L.S. Bazzo, S.J. Giacomini (2019) N_2O emission increases with mulch mass in a fertilized sugarcane cropping system. Biology and Fertility of Soils 55, 511–523. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01366-7>
- > P.L. Pinheiro, S. Recous, G. Dietrich, D.A. Weiler, R. L. Giovelli, A.P. Mezzalana, S.J. Giacomini. (2018) Straw removal reduces the mulch physical barrier and ammonia volatilization after urea application in sugarcane. Atmospheric Environment, 194, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.031>



Contact : Sylvie Recous

Unité : UMR FARE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Grand-Est Nancy

Thèmes : Agroécologie, Changements globaux

Mots clés : Résidus de culture, carbone, azote, gaz à effet de serre



Un cadre d'évaluation des services rendus par les sols adapté à la planification territoriale

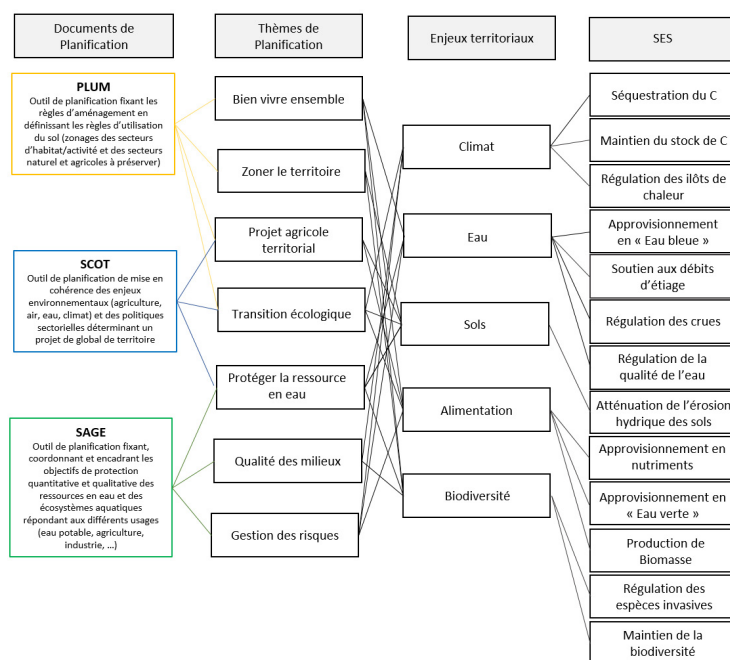
Interface critique au sein de l'environnement, les sols contribuent à la fourniture de nombreux services écosystémiques. Néanmoins, si la volonté de protéger les ressources en sol est à présent bien inscrite dans les politiques publiques, leur prise en compte effective en matière de planification territoriale reste un défi, généralement faute d'information suffisante, mais aussi faute d'un cadre d'évaluation pertinent. Un tel cadre d'évaluation, adapté aux territoires agricoles, est proposé pour évaluer les modifications des services écosystémiques déterminés par les sols selon les scénarios considérés et pour fournir des indicateurs synthétiques pouvant être pris en compte parmi les critères de décision de la planification territoriale. Ce cadre est basé sur un modèle conceptuel qui est ensuite traduit en un outil opérationnel. Le modèle conceptuel relie les services écosystémiques auxquels contribuent les sols agricoles à des enjeux de développement socio-économiques et de durabilité des territoires. L'outil opérationnel est basé sur la modélisation de ces services écosystémiques et permet la comparaison de différentes options d'affectation ou de gestion des sols cultivés. Des indicateurs synthétiques issus de cette comparaison de modélisation sont alors proposés en appui au choix parmi les différents scénarios étudiés. Ce cadre d'analyse des services écosystémiques, intégrant les ressources en sol dans la gouvernance territoriale, devrait faciliter leur intégration dans les chaînes de décision et ainsi, au final, améliorer la prise en compte des ressources en sol.

CONTEXTE ET ENJEUX

La planification territoriale regroupe l'ensemble des procédures et des documents de planification (PLU, SCOT, SAGE, etc.) qui organisent l'aménagement de l'espace des territoires. Il s'agit d'un outil essentiel pour traduire des objectifs stratégiques en projet de territoire mis en oeuvre à court ou moyen termes. L'élaboration de cette planification territoriale suppose de croiser et de concilier de nombreux enjeux thématiques, dont la préservation des ressources en sol et des services écosystémiques associés : la réduction forte de l'artificialisation des terres agricoles (objectif « zéro artificialisation nette ») est un exemple d'objectif stratégique qui suppose d'être traduit dans des documents de planification et pour cela nécessite que les sols soient pris en compte parmi les critères de décision.

RÉSULTATS

Un travail d'expertise collective, mené dans le cadre du programme de recherche SoilServ financé par l'ANR et associant des spécialistes des sols, des agronomes et des experts de planification territoriale, a conçu un cadre d'évaluation permettant de prendre en compte les sols agricoles dans la planification territoriale. Le concept de « services écosystémiques



Les liens entre les thèmes de planification, les enjeux territoriaux et 13 services écosystémiques auxquels les sols contribuent de façon importante pour différentes échelles de planification (PLU, SCOT ou SAGE) Fossey et al. EGS

rendus par les sols » (SES) est mobilisé pour permettre la comparaison relative de différents scénarios d'aménagement et identifier les pratiques d'utilisation et de gestion des terres qui optimisent ces services. La mise en œuvre opérationnelle repose sur l'utilisation de modèles dynamiques de croissance des cultures et des flux de carbone et d'azote dans les agroécosystèmes, qui permettent d'estimer sur un territoire treize SES selon différents scénarios d'aménagement, mais aussi en fonction de la variabilité climatique et de la diversité des sols. Ces estimations permettent de positionner chaque scénario par rapport à l'offre actuelle de SES, mais aussi par rapport à une offre optimale identifiée lors de la comparaison des scénarios.



*La planification territoriale oriente l'utilisation et la gestion des terres et à ce titre doit tenir compte des services écosystémiques rendus par les sols.
(Air Papillon 2011 ©photo UMR SAS)*

PERSPECTIVES

Les applications de ce cadre conceptuel ont déjà débuté sur le territoire de la métropole de Nantes-St Nazaire en lien avec un bureau d'étude spécialisé en planification territoriale et les ingénieurs de la métropole. L'étape suivante va être de construire un outil suffisamment opérationnel et simple d'utilisation pour qu'il puisse s'inscrire dans les étapes ordinaires d'une planification territoriale.

VALORISATION

- > Fossey M, Angers D, Bustany C, Cudennec C, Durand P, Gascuel-Oudou C, Jaffrezic A, Pérès G, Besse C and Walter C (2020) - A Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning. Front. Environ. Sci. 8:28. doi: 10.3389/fenvs.2020.00028
- > Fossey M, Walter C, Martin R., Warot G. 2020. Evaluation des services écosystémiques des sols agricoles en appui à la planification territoriale : cas du Pôle métropolitain de Nantes St-Nazaire. A paraître dans Etude et Gestion des Sols.
- > Fossey M., Besse C, Von Fischer C., Walter. 202# - Les services écosystémiques des sols – enjeu d'aménagement du territoire. Revue d'urbanisme DIAGONAL, n°210.
- > Walter C., D. Angers, Y. Ellili, M. Fossey, B. Lemerrier, D. Michot, N. Saby & G. Warot. 2019 - Assessment of soil ecosystem services for territorial planning. Wageningen Soil Conference, Understanding soil functions, 27-30 August 2019



Contact : Christian Walter

Unité : UMR SAS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bretagne-Normandie

Métaprogramme : Ecoserv

Thèmes : Ressources et bioéconomie, Société et territoires

Mots clés : Sol, territoires agricoles, planification territoriale, aide à la décision



Une nouvelle approche d'estimation des bilans de carbone à la parcelle sur de larges territoires basée sur l'utilisation de données satellites haute résolution

Une nouvelle approche d'estimation des bilans de carbone à la parcelle combinant télédétection à haute résolution et modélisation agronomique a été développée au Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère. Le modèle agro-météorologique SAFYE-CO₂ est contraint jusqu'à reproduire fidèlement le développement de la végétation telle qu'elle est « vue » par le satellite (Sentinel 2 de l'ESA), ce qui permet de prendre en compte implicitement l'effet des stress abiotiques et des pratiques sur la production de biomasse et les composantes du bilan de carbone (flux de CO₂, export de carbone à la récolte). Cette approche est particulièrement bien adaptée à la quantification de l'effet des cultures intermédiaires, un des principaux leviers d'atténuation en agriculture, sur le stockage de C dans les sols agricoles.

CONTEXTE ET ENJEUX

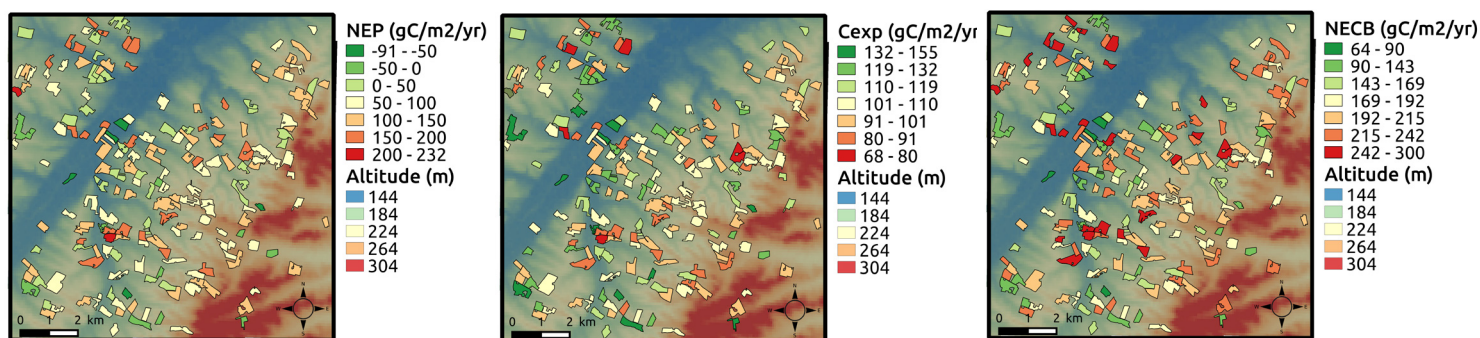
L'agriculture peut contribuer à l'atténuation du changement climatique par stockage additionnel de carbone dans les sols. Des progrès sont cependant nécessaires pour mieux quantifier le bilan carbone des écosystèmes cultivés et explorer l'intérêt de pratiques « stockantes » sur de grands territoires. Deux études parues cette année dans *Geoderma* (Pique et al., 2020a) et *Remote Sensing* (Pique et al., 2020b) présentent un nouveau modèle agro-météorologique (SAFYE-CO₂) qui simule le développement d'espèces cultivées et de cultures intermédiaires. Le modèle permet d'estimer les flux d'évapotranspiration ainsi que les composantes du bilan carbone, dont la biomasse, le rendement et les flux de CO₂ (photosynthèse, respiration du sol et des plantes, flux net). L'idée est d'utiliser des données satellites (Sentinel 2 de l'Agence Spatiale Européenne) à hautes résolutions spatiale (10m) et temporelle (6j) pour calibrer la phénologie et l'efficacité de photosynthèse de la végétation, ce qui permet au modèle de reproduire le développement des cultures et des couverts végétaux « vus » par le satellite. Aussi, l'assimilation de données satellite dans le modèle permet de prendre en compte implicitement l'effet des stress (N, eau...) sur le développement de la végétation et de s'affranchir de la collecte de la plupart des données concernant les pratiques culturales (fertilisation, dates de semis...), ce qui rend le modèle plus facilement spatialisable à grande échelle.

RÉSULTATS

En s'appuyant sur un jeu de données de validation exhaustif (sites ICOS d'Auradé et de Lamasquère, données de l'Observatoire Spatial Régional), l'équipe du CESBIO a montré que SAFYE-CO₂ était capable de reproduire la production avec une bonne précision (ex. RRMSE¹ de 27% et 21% pour la biomasse et le rendement du blé, respectivement). Le modèle est aussi capable de reproduire les flux de CO₂ avec très peu d'erreur (RMSE de 1.74, 1.13 et 1.29 gC.m⁻².j⁻¹ pour la photosynthèse, la respiration de l'écosystème et le flux net d'une culture de blé, respectivement). De plus, les bilans carbone estimés par cette approche sont conformes aux observations, ce qui démontre le potentiel de cette approche pour l'estimation à la parcelle des bilans de carbone sur de grands territoires.

PERSPECTIVES

Le couplage avec un module d'évolution de la matière organique du sol permettra de gagner encore en précision. Aussi, la mise en



Cartographie des flux nets annuels de CO₂ (NEP), de la quantité de carbone exporté à la récolte (Cexp) et du bilan annuel de C (NECB) en 2015 pour des parcelles de tournesol près de Toulouse à l'aide du modèle SAFYE-CO₂. (Pique et al. 2020, dans Remote Sensing)

œuvre de SAFYE-CO₂ sur d'autres grandes cultures (maïs, colza) nous permettra prochainement de simuler des rotations de cultures. Cette approche va être mise en œuvre dans le cadre du projet H2020 NIVA dont un des objectifs est de démontrer, via la mise en œuvre sur des sites pilotes, que des indicateurs du bilan de carbone des cultures peuvent être produits à grande échelle. Ces indicateurs pourraient à terme être utilisés pour conditionner les aides PAC à la mise en œuvre de pratiques vertueuses pour le climat.

VALORISATION

Appui aux politiques publiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Pique G., Fieuzal R., Al Bitar A., Veloso A., Tallec T., Brut A., Ferlicoq M., Zawilski B., Dejoux J.-F., Gibrin H., Ceschia E. (2020) Estimation of daily CO₂ fluxes and of the components of the carbon budget for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. GEODERMA, 376, 114428. DOI : 10.1016/j.geoderma.2020.114428
- > Pique G., Fieuzal R., Debaeke P., Al Bitar A., Tallec T., Ceschia E. (2020) Combining high-resolution remote sensing products with a crop model to estimate carbon and water budget components: Application to sunflower. Remote Sensing, 12, 2967, doi:10.3390/rs12182967

¹ Le RRMSE (ou erreur relative de la racine carrée moyenne) est une mesure fréquemment utilisée en statistiques pour quantifier la différence entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées.



Contact : Eric Ceschia

Unité : USC CESBIO

Départements : ECODIV, AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Toulouse

Métapogramme : CLIMAE

Thèmes : Agroécologie, Changements globaux

Mots clés : Bilan C, agriculture, modélisation, télédétection



SMOS fête ses 10 ans en orbite

Le satellite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) a été lancé en novembre 2009 et a fonctionné depuis sans interruption. L'INRA a été associé à ce projet dès les premières années car parmi ses objectifs scientifiques il y a le suivi des milieux agricoles via l'humidité superficielle des sols et le contenu en eau des couverts et ce pour la première fois grâce à une mesure directe. Dix ans après le lancement le défi a été relevé et, outre les objectifs de départ qui ont tous été atteints, de nombreuses autres avancées ont été réalisées et se sont concrétisées en des applications opérationnelles (assimilation dans le modèle de prévision du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT/ECMWF), alertes aux risques d'inondations ou d'incendies, estimations de rendement, ...) et scientifiques (analyse de tendances climatiques en matière de sécheresse, d'évolution de la biomasse par exemple). Le niveau des publications associées est exceptionnel en quantité (de l'ordre de 1500) et en qualité (plusieurs articles dans la revue Nature). Des résultats très significatifs ont été également obtenus sur les océans (salinité, vents forts, couche de mélange et flux à l'interface, épaisseur des glaces de mer etc...) et la cryosphère (gel dégel, pergélisol, densité de la neige etc...). Avec maintenant plus de 10 ans de données, il commence à être possible de suivre des tendances comme la diminution des glaces de mer autour des pôles, l'évolution de l'humidité des sols à l'échelle globale, les tendances de la biomasse en milieu tropical ou boréal, ouvrant de nouvelles perspectives.

CONTEXTE ET ENJEUX

C'est la première mission satellite mesurant directement l'humidité des sols et la salinité des océans et ce avec un instrument totalement nouveau : un interféromètre opérant qui plus est en bande L (soit 1.4 GHz). La mission a été conçue en France et les équipes françaises sont au cœur des algorithmes et des percées scientifiques. Les enjeux étaient de fournir à la communauté scientifique des mesures fréquentes et précises d'humidité superficielle des sols et de salinité des océans. Le but étant de fournir une composante clef du bilan hydrique avec tout ce que cela implique sur le plan de la gestion des ressources en eau et du suivi / anticipation de l'évolution de la biomasse.

RÉSULTATS

Cette mission dimensionnée pour 5 ans et prévue pour 3, a fonctionné plus de 3 fois sa durée de vie minimale prévue et fonctionne toujours parfaitement. Dès la fin de la recette en vol, les premiers résultats sont apparus. Ils ont prouvé que ce type nouveau de mesure permettait d'accéder pour la première fois à de vraies mesures de l'humidité des sols (même en présence de végétation dense), ce qui s'est traduit par le développement d'applications pratiques qui n'avaient jamais pu émerger auparavant. Cela va du suivi des surfaces en eau libre, de la prévision des risques d'inondations et d'incendies, le suivi des sécheresses, les prévisions de rendement ou l'amélioration des estimations de précipitation pour n'en citer que quelques-unes. Mais les plus grosses avancées ont eu lieu peut être dans la capacité de cet instrument à quantifier la biomasse jusqu'à 350 T/ha. En conséquence, outre le suivi des cultures il est possible d'étudier le stockage de carbone dans la végétation et son évolution dans le temps et l'espace. Il faut enfin noter que les données sont assimilées (et disponibles

en temps réel) dans plusieurs centres de prévision numérique du temps (CEPMMT/ ECMWF, Environnement Canada, US Air Force, NOAA, BoM, etc..).

PERSPECTIVES

Les données vont continuer à s'accumuler bien sûr et nous espérons que la mission va continuer à être opérationnelle pendant encore plusieurs années, permettant d'une part d'augmenter la profondeur temporelle des analyses et d'assurer la continuité des données pour toutes les applications opérationnelles, et d'autre part de permettre le développement de nouvelles recherches notamment sur le suivi du manteau neigeux et des surfaces océaniques. Le plus important sera probablement d'une part l'avancée des travaux de désagrégation (obtention de données à plus haute résolution spatiale) et d'autre part les travaux sur la continuation de ces mesures via la mise en place d'un successeur à SMOS (SMOS-HR – SMOS-NEXT). Le projet est actuellement en démarrage de phase A au CNES autour d'équipes françaises.

VALORISATION

Il y a eu plus de 1500 publications (WoS H index de 66), d'innombrables sessions dédiées dans les grands colloques et symposiums internationaux (AGU, EGU, IGARSS, RAQRS, URSI etc...) et des documents de valorisations (tables rondes, films, présentations grand public, etc...).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Publications dans RSE, Nature, IEEE TGARS, JGR, RS, etc...

> Fan, L., Wigneron, J.P., Ciais, P., Chave, J., Brandt, M., Fensholt, R., Saatchi, S.S., Bastos, A., Al-Yaari, A., Hufkens, K., Qin, Y.W., Xiao, X.M., Chen, C., Myneni, R.B., Fernandez-Moran, R., Mialon, A., Rodriguez-Fernandez, N.J., Kerr, Y., Tian, F., & Penuelas, J. (2019). Satellite-observed pantropical carbon dynamics. *Nature Plants*, 5, 944-951

> Tian, F., Wigneron, J.P., Ciais, P., Chave, J., Ogee, J., Penuelas, J., Raebild, A., Domec, J.C., Tong, X.Y., Brandt, M., Mialon, A., Rodriguez-Fernandez, N., Tagesson, T., Al-Yaari, A., Kerr, Y., Chen, C., Myneni, R.B., Zhang, W.M., Ardo, J., & Fensholt, R. (2018). Coupling of ecosystem-scale plant water storage and leaf phenology observed by satellite. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1428-1435

> Rodriguez-Fernandez, N.J., Mialon, A., Mermoz, S., Bouyet, A., Richaume, P., Al Bitar, A., Al-Yaari, A., Brandt, M., Kaminski, T., Toan, T.L., Kerr, Y.H., & Wigneron, J.P. (2018). An evaluation of SMOS L-band vegetation optical depth (L-VOD) data sets: high sensitivity of L-VOD to above-ground biomass in Africa. *Biogeosciences*, 15, 4627-4645

> Brandt, M., Wigneron, J.P., Chave, J., Tagesson, T., Penuelas, J., Ciais, P., Rasmussen, K., Tian, F., Mbow, C., Al-Yaari, A., Rodriguez-Fernandez, N., Schurgers, G., Zhang, W.M., Chang, J.F., Kerr, Y., Verger, A., Tucker, C., Mialon, A., Rasmussen, L.V., Fan, L., & Fensholt, R. (2018). Satellite passive microwaves reveal recent climate-induced carbon losses in African drylands. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 827-835

> Sadri, S., M. Pan, Y. Wada, N. Vergopolan, J. Sheffield, J. S. Famiglietti, Y. Kerr, and E. Wood. 2020. 'A global near-real-time soil moisture index monitor for food security using integrated smos and smap', *Remote Sensing of Environment*, 246.-: 10.1016/j.rse.2020.111864

> Su, Z., J. Wen, Y. Zeng, H. Zhao, S. Lv, R. van der Velde, D. Zheng, X. Wang, Z. Wang, M. Schwank, Y. Kerr, S. Yueh, A. Colliander, H. Qian, M. Drusch, and S. Mecklenburg. 2020. 'Multiyear in-situ L-band microwave radiometry of land surface processes on the tibetan plateau', *Scientific Data*, 7.-: 10.1038/s41597-020-00657-1

Principales revues

Remote sensing of the environment, Ieee Transactions on Geoscience and Remote sensing, Journal of Geophysical Research, remote sensing, Nature Ecology & Evolution, Nature Plants, Nature Scientific data



Contact : Yann Kerr

Unité : CESBIO

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Toulouse-Occitanie

Thèmes : Changements globaux, Ressources et bioéconomie

Métaprogramme : CLIMAE

Mots clés : Satellite, radiométrie hyperfréquence, humidité des sols, contenu en eau de la végétation, prévision de rendements, événements extrêmes



L'eau en milieu agricole : outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale

Cet ouvrage aborde la gestion de l'eau en milieu rural où l'agriculture se trouve souvent être le premier usager de la ressource. La durabilité de la ressource en eau nécessite de dépasser les approches sectorielles, encore largement en cours malgré divers courants appelant à une gestion intégrée, territoriale ou adaptative de la ressource. Cet ouvrage collectif analyse les enjeux, outils et démarches permettant de faciliter et d'accompagner la coordination entre les parties prenantes de la gestion de l'eau. Il fait également un panorama large des outils, des méthodes et des données actuellement disponibles. Enfin, il décrit des exemples de mises en œuvre dans différents cas d'étude. Cet ouvrage de synthèse s'adresse à un public large, allant des chercheurs, étudiants et enseignants en gestion de l'eau aux professionnels concernés par sa mise en œuvre. Il a été coordonné par 3 chercheurs INRAE des départements ACT, AgroEcoSystem et AQUA, et a rassemblé un collectif de 50 auteurs dont 34 chercheurs INRAE.

CONTEXTE ET ENJEUX

L'eau est un enjeu majeur dans de nombreuses régions du monde du fait de besoins en forte croissance, mais aussi de la dégradation des ressources disponibles. L'agriculture étant le premier usager de la ressource en eau, la durabilité de la gestion de l'eau en milieu rural est cruciale. Les démarches de gestion de l'eau nécessitent de dépasser les approches sectorielles, encore largement dominantes. Dans cet objectif, cet ouvrage rassemble une synthèse originale d'un ensemble de disciplines (agronomie, climatologie, économie, ergonomie, géographie, hydrologie, informatique, pédologie, sciences de gestion, sciences politiques, sociologie) sur les concepts, outils et méthodes actuellement mobilisés pour conduire une gestion durable de l'eau intégrative et territorialisée.

RÉSULTATS

Une gestion durable de l'eau requiert des visions pluridisciplinaires et territorialisées. Ce besoin est particulièrement marqué en milieu agricole, où l'objectif de gestion de la ressource en eau doit s'articuler avec de nombreux autres objectifs dont celui majeur de la production agricole. Dans l'ouvrage une discussion est menée sur le caractère illusoire et souvent biaisé d'une démarche de gestion de l'eau visant une intégration complète des objectifs des différentes parties prenantes au sein d'une seule politique. Il lui est préféré une démarche de coordination entre acteurs, certes moins ambitieuse mais qui pose de manière plus pragmatique et contextualisée les enjeux souvent divergents de la gestion de l'eau. L'ouvrage explore donc la multiplicité des interactions d'ordre biophysique, technique, économique et social liées à la gestion de l'eau et donc la multiplicité des formes de coordination nécessaires. Il synthétise également l'ensemble des outils et démarches les plus récents pouvant faciliter la démarche de coordination. Il s'agit des outils pour diagnostiquer l'état de la ressource et des usages, rendre visible l'importance des enjeux aux différentes parties prenantes, évaluer les effets et les expliquer, structurer les échanges et élaborer des actions de gestion. Plusieurs états des lieux sont effectués. Ils concernent les bases de données mobilisables et indispensables à toute gestion



de l'eau, les approches de modélisation pour une représentation intégrée et dynamique de l'évolution de la ressource en eau et les méthodes pour initier et structurer le processus de coordination entre acteurs. L'ouvrage promeut ainsi l'existence d'une boîte à outils pour accompagner un ensemble d'acteurs dans la réflexion, l'élaboration, le suivi et la coordination de leurs actions en faveur d'une gestion durable de la ressource en eau, qu'il s'agisse d'actions de mise en place de politiques publiques ou d'actes techniques. Les études de cas présentées en fin d'ouvrage montrent que la manière d'assembler les différents outils ne peut être générale mais varie selon les problématiques locales. La gestion de l'eau est de fait souvent un enjeu parmi d'autres à l'échelle d'un territoire, sa coordination devrait donc s'inscrire préférentiellement dans le cadre de projets territoriaux partagés.

PERSPECTIVES

L'ouvrage en lui-même pourra alimenter les réflexions actuelles au sein d'INRAE sur les recherches et l'appui aux politiques publiques dans le domaine eau-agriculture.

VALORISATION

L'ouvrage est publié en accès libre pour sa version numérique.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

> Leenhardt, D., Voltz, M., Barreteau, O. (éditeurs) 2020. L'eau en Milieu Agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale. Versailles, Editions Quae, 288 p. (coll. Synthèses)



Contact : Marc Voltz

Unités : UMR LISAH, UMR AGIR, G-Eau

Départements : ACT, AgroEcoSystem et AQUA

Centre INRAE : Occitanie-Montpellier

Thèmes : Agroécologie, Société et territoires, Ressources et bioéconomie

Mots clés : Eau, gestion intégrée, gouvernance territoriale



L'urine humaine : un engrais pour demain ?

L'agriculture actuelle est fortement tributaire de fertilisants issus de ressources fossiles et/ou fortement consommateurs d'énergie fossile. Or les nutriments contenus dans les urines humaines pourraient être séparés à la source par des toilettes adaptées, puis valorisés en agriculture. Ainsi les urines produites en région parisienne représentent 110% de l'azote et 40% du phosphore utilisés actuellement pour la fertilisation minérale des cultures en Ile de France. La majorité des nutriments de l'alimentation humaine est excrétée dans les urines (80% du N, 50% du P et 70% du K), puis se retrouve dans les eaux usées dont la gestion actuelle ne permet qu'un faible recyclage de ces nutriments (4% du N, 41% du P et 2% du K) et empêche le bouclage de leur cycle biogéochimique. Une fois l'urine séparée, différents traitements sont possibles pour réduire les pertes azotées, les odeurs, et le volume pour obtenir un fertilisant concentré ou pour traiter les contaminants. Ces traitements aboutissent à différents fertilisants aux caractéristiques physico-chimiques variées. L'efficacité agronomique de la plupart de ces « urinofertilisants » est proche de celle des engrais minéraux azotés et phosphatés. En fonction de leurs caractéristiques, les « urinofertilisants » peuvent être sensibles à la volatilisation ammoniacale. Si leur contamination en métaux et en organismes pathogènes est faible, la question de la présence de micropolluants organiques tels que des résidus pharmaceutiques reste importante. Des filières commencent à se mettre en place dont il faudra réaliser l'évaluation environnementale en prenant en compte la consommation d'énergie et de réactifs lors des traitements, mais aussi les économies faites dans le traitement des eaux usées ou de l'installation des réseaux nécessaires. Les conditions de faisabilité technico-économique restent cependant à définir.

CONTEXTE ET ENJEUX

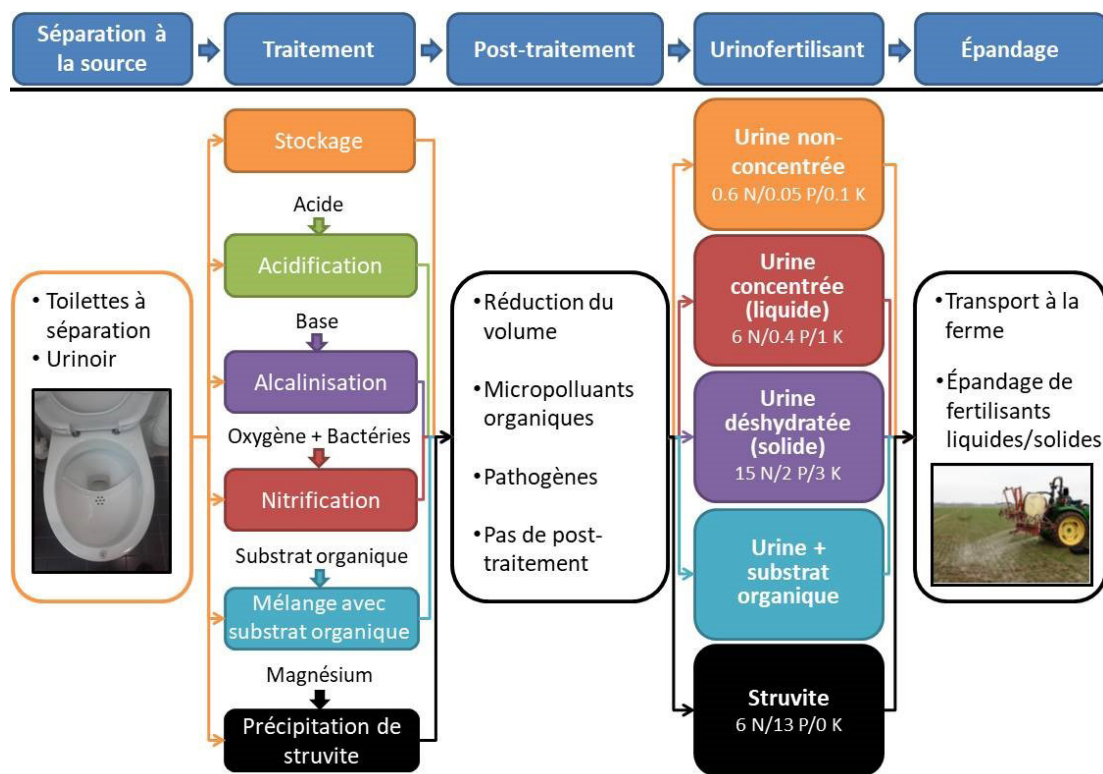
La grande majorité des engrais utilisés en agriculture sont d'origine minérale (azote Haber-Bosch ou phosphore d'origine minière). En raison de l'impact de leur production sur des ressources fossiles non renouvelables et sur l'environnement à l'échelle planétaire, l'usage massif de ces fertilisants qui est fait aujourd'hui n'est pas durable (Cordell et al., 2009 ; Steffen et al., 2015). La majorité des nutriments de l'alimentation humaine est excrétée dans les urines et se retrouvent dans les eaux usées. Leur gestion ne permet qu'un faible recyclage de ces nutriments et empêche le bouclage des cycles biogéochimiques. Par exemple, seulement 4% de l'azote, 41% du phosphore et 2% du potassium des eaux usées sont recyclés vers l'agriculture au niveau de l'agglomération parisienne sous forme de boues d'épuration (Esculier et al., 2018).

L'urine peut cependant être séparée à la source dans des toilettes adaptées pour être ensuite utilisée comme fertilisant en agriculture. Plusieurs traitements sont possibles pour produire différents fertilisants à base d'urine, ou « urinofertilisants », aux caractéristiques physico-chimiques variées.

RÉSULTATS

L'azote est excrété dans l'urine sous forme d'urée, rapidement dégradée en azote ammoniacal, ce qui peut aboutir à des pertes d'azote par volatilisation ou des odeurs désagréables. Différents traitements ont pour objectif de stabiliser l'azote dans une forme limitant ces pertes. Le phosphore est quant à lui majoritairement excrété sous forme de phosphate. Il peut être conservé en solution ou extrait par précipitation (struvite). L'urine brute contenant 95% d'eau est un fertilisant dilué en comparaison des engrais minéraux. Différents traitements ont pour but de concentrer les nutriments dans l'urine, voire de déshydrater l'urine, permettant de limiter les volumes à apporter. La contamination en éléments traces et en organismes pathogènes des « urinofertilisants » est généralement faible et peut être efficacement traitée. Des questions subsistent cependant quant à la nécessité de traiter les micropolluants organiques et spécifiquement les résidus pharmaceutiques

potentiellement présents dans l'urine. La consommation d'énergie et de réactifs au cours de ces différents traitements de l'urine peut être élevée et nécessite d'être prise en compte dans l'évaluation des filières de valorisation de l'urine. Contrairement à la gestion actuelle des eaux usées, les filières de valorisation de l'urine semblent plus adaptées à une échelle décentralisée ne nécessitant pas forcément de nouveaux réseaux pour gérer l'urine. L'efficacité fertilisante de la plupart des « urinofertilisants » est proche de celle des engrais minéraux (N et P) et plus élevée que pour les engrais organiques classiques, tels que les lisiers pour l'azote. Cette efficacité fertilisante a été confirmée par différents essais agronomiques réalisés sur le plateau de Saclay. Cependant, en fonction de leurs caractéristiques, les « urinofertilisants » peuvent être sensibles à la volatilisation ammoniacale qui peut entraîner divers impacts environnementaux (eutrophisation, pollution de l'air).



Résumé des traitements et filières de valorisation étudiées ©Tristan Martin, Fabien Esculier

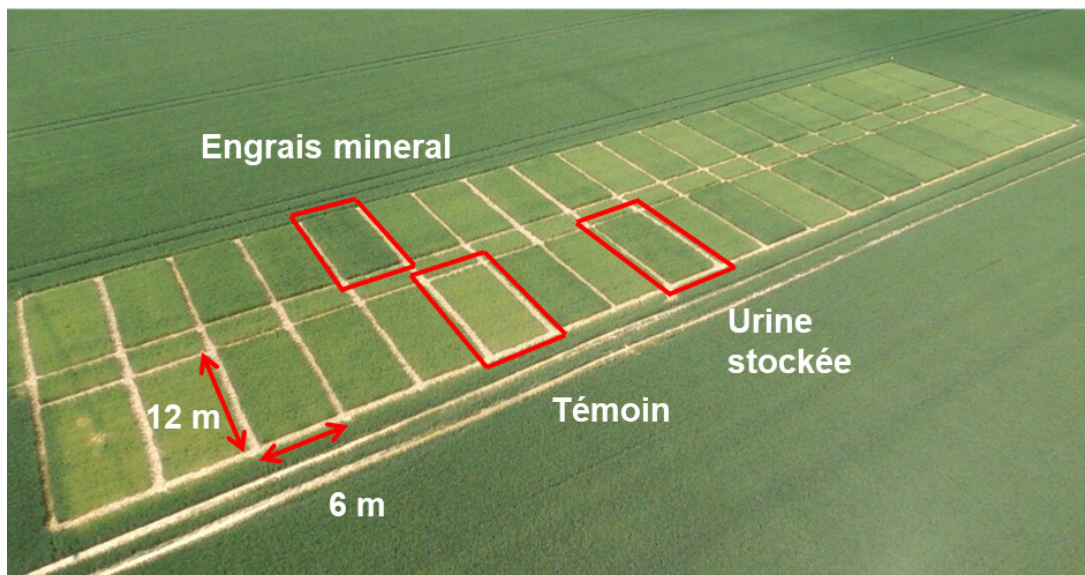
PERSPECTIVES

Les « urinofertilisants » sont des fertilisants efficaces dérivés d'une ressource actuellement non valorisée. Ils peuvent représenter une source d'azote et de phosphore importante. Ainsi, l'azote de l'urine des habitants de l'agglomération parisienne représente 40% du phosphore et 110% de l'azote et du potassium utilisés en Ile-de-France sous forme d'engrais. Afin de mieux évaluer les impacts et bénéfices environnementaux des différentes filières de valorisation de l'urine en agriculture, des filières pilotes sont nécessaires. Une forte dynamique est observée en région parisienne ces dernières années. L'Agence de l'Eau Seine-Normandie, en particulier, a intégré dans son programme d'intervention la possibilité de subventionner jusqu'à 80% des projets de séparation à la source de l'urine. Plusieurs projets de quartiers ou d'immeubles équipés de toilettes à séparation à la source de l'urine sont actuellement étudiés.

VALORISATION

> Martin TMP, Esculier F, Levavasseur F, Houot S (2020) Human urine-based fertilizers: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 0:1-47. doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214

> Levavasseur F, Martin T (2020). De l'urine recyclée pour les futurs engrais. The conversation. theconversation.com/de-lurine-recyclee-pour-les-futurs-engrais-129945



*Essai agronomique mené
sur le plateau de Saclay
©Christophe Dion*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Martin TMP, Esculier F, Levavasseur F, Houot S (2020) Human urine-based fertilizers: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 0:1–47 <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214>
- > Esculier F, Le Noë J, Barles S, Billen G, Créno B, Garnier J, Lesavre J, Petit L, Tabuchi J-P (2018) The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: A regionalized analysis of a water-agro-food system. Journal of Hydrology. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.043
- > Steffen W, Richardson K, Rockstrom J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, Biggs R, Carpenter SR, de Vries W, de Wit CA, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace GM, Persson LM, Ramanathan V, Reyers B, Sorlin S (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science 347:1259855–1259855. doi.org/10.1126/science.1259855



Contacts : Tristan Martin, Sabine Houot, Florent Levavasseur

Unité : UMR ECOSYS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Ile-de-France - Versailles-Grignon

Métapogramme : BETTER

Thèmes : Agroécologie, Ressources et bioéconomie

Mots clés : Urine humaine, engrais, azote, recyclage



Les innovations des agriculteurs, source de connaissances pour la reconception des systèmes agricoles : le cas des associations pluri-spécifiques à base de légumineuses

La transition agroécologique exige une transformation profonde et systémique des pratiques agricoles. Parmi les innovations candidates, les associations pluri-spécifiques sont connues pour réduire les impacts environnementaux de l'agriculture, tout en maintenant, voire en augmentant le rendement. Peu répandues dans les parcelles agricoles, certains agriculteurs en cultivent pourtant avec satisfaction et ces innovations rares peuvent être sources d'inspiration pour d'autres. Dans ce sens, nous avons réalisé une traque chez des agriculteurs innovants et pionniers : repérer et analyser les associations conçues et cultivées par ces agriculteurs a permis de produire et de formaliser des connaissances concernant les logiques d'action de ces agriculteurs, conduisant ainsi à la formalisation de ressources utiles pour aider d'autres agriculteurs à concevoir les associations adaptées à leur propre situation. Au total, 77 associations combinant 29 espèces différentes, non rencontrées dans la littérature, ont été étudiées, organisées en 7 types différents, caractérisés par l'organisation temporelle de l'association et le débouché visé pour la production. La grande diversité des choix techniques observés entre les associations étudiées a été expliquée par les objectifs visés par l'agriculteur, ses critères d'évaluation et le contexte de la ferme.

CONTEXTE ET ENJEUX

La diversité cultivée a considérablement diminué dans les systèmes agricoles des pays développés depuis plusieurs décennies. Les associations pluri-spécifiques sont une manière d'accroître cette diversité, et notamment de réintroduire des légumineuses dans les systèmes agricoles, tout en favorisant leurs conduites, et en améliorant le rendement et différents services écosystémiques. Ces associations sont très rares dans les systèmes agricoles actuels des pays développés, et peu étudiées par les scientifiques. Or, certains agriculteurs innovent, et leurs innovations, tout comme leur raisonnement pour concevoir ces innovations, sont sources de connaissances et de savoir-faire pour d'autres. Pour produire des connaissances sur des associations pluri-spécifiques, de manière complémentaire aux approches classiques, nous avons réalisé une traque aux innovations visant à identifier les associations cultivées par les agriculteurs, et décrire leurs logiques d'action, dans le but de stimuler la conception chez d'autres agriculteurs.

RÉSULTATS

La démarche de traque a consisté en 7 étapes : (1) définir quels types de pratiques innovantes sont recherchés ; (2) repérer des agriculteurs cultivant des associations ; (3) décrire l'association cultivée par l'agriculteur enquêté, et notamment sa logique d'action, c'est-à-dire les liens entre son objectif (ses résultats attendus), ses choix techniques, et ses critères d'évaluation ; (4) évaluer les associations décrites, sur la base des critères des agriculteurs (les critères motivant les choix techniques) ; (5) spécifier les conditions de succès des associations, pour faciliter l'utilisation des connaissances produites, dans d'autres situations agricoles ; (6) proposer une typologie d'associations et mettre en correspondance les types avec les objectifs visés par les agriculteurs ; (7) produire des ressources cognitives d'aide à la conception à partir d'une analyse croisée des logiques d'actions des différentes associations étudiées. Nous avons recherché des associations de cultures annuelles incluant au moins une culture produisant des grains ou du fourrage récoltés (excluant les associations avec uniquement des plantes de service, telles que les couverts d'interculture), en nous centrant dans deux régions (Pays de Loire et région Toulousaine). Au total,

47 agriculteurs ont été enquêtés, dont 24 en Agriculture Biologique, ce qui nous a donné accès à 77 associations différentes, la quasi totalité incluant une légumineuse, et la plupart n'étant pas étudiée dans la littérature. Nous avons regroupé ces associations en 7 types, caractérisés par leur calendrier de culture (hiver/printemps), leur composition (2 cultures de rente, plus de 2 cultures récoltées, 1 culture de rente avec plantes compagnes, semées ensemble ou en relai, 2 cultures de rente cultivées en relai – double culture, 1 culture de rente semée dans un couvert permanent pré-établi), et leur débouché (production de grains, de fourrages, ou de services).



Association soja-sarrasin
©Valentin Verret



Association féverole-triticale
©Elise Pelzer

Les pratiques mises en œuvre sur ces associations étaient très différentes entre agriculteurs et très cohérentes avec les objectifs visés par les agriculteurs (ce qu'ils attendaient de leur association) et aux caractéristiques de leur situation agricole. L'évaluation des résultats obtenus, en fonction des pratiques mises en œuvre, a reposé sur les convergences entre les récits des agriculteurs et la confrontation à la littérature scientifique. Sur la base de l'analyse croisée des associations, nous avons formalisé les connaissances produites dans des ressources cognitives, outils destinés à soutenir la conception chez d'autres agriculteurs.

PERSPECTIVES

Les ressources cognitives produites seront partagées dans l'outil GECO (outil collaboratif dédié à la transition agroécologique, <https://geco.ecophytopic.fr>), pour accompagner la conception d'associations dans des dispositifs d'innovation ouverte, dans une perspective de diversification des systèmes de culture et de développement des légumineuses. Nous avons également identifié des trous de connaissances susceptibles d'ouvrir de nouveaux champs de recherche. Enfin, les types de ressources cognitives produites ont vocation à être remobilisés pour formaliser les connaissances produites sur d'autres thématiques.

VALORISATION

Scientifique à 1 publication scientifique + 1 publication dans Innovations Agronomiques + plusieurs communications en congrès Vers le Développement : mise en ligne des fiches décrivant les associations (<https://www.remix-intercrops.eu>).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Verret V., Pelzer E., Bedoussac L., Jeuffroy M.H., 2020. Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design: the case of annual mixtures including a legume crop. *Eur J Agr*, 115, 126018.

> Verret V., Pelzer E., Bedoussac L., Jeuffroy M.-H., 2019. Traque aux innovations d'agriculteurs pour la conception d'associations d'espèces incluant des légumineuses. *Innovations agronomiques*, 74, 143-154



Contact : Marie-Hélène Jeuffroy

Unité : UMR Agronomie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Ile-de-France - Versailles-Grignon

Thèmes : Agroécologie, Société et territoires

Mots clés : Association pluri-spécifique, innovation ouverte, conception, connaissances expertes, traque aux innovations



Conception participative de scénarios agronomiques pour la réintroduction de légumineuses à l'échelle d'un territoire

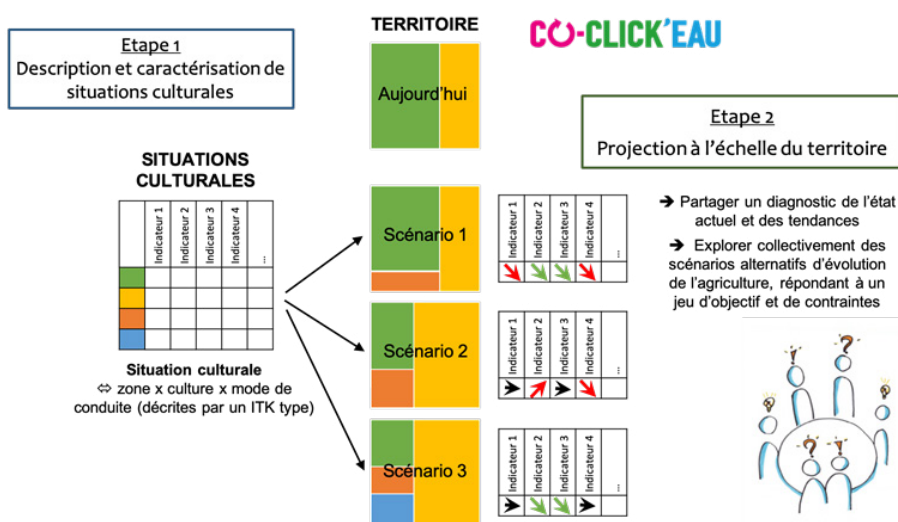
Associer la richesse d'une approche participative impliquant l'ensemble des acteurs d'un territoire avec la puissance des outils de simulation : telle est l'originalité de la démarche qui a été mise en œuvre à l'échelle du plateau Langrois, afin d'évaluer son potentiel pour la réintroduction de légumineuses. Dans une première étape, des ateliers participatifs, enquêtes et traitement de données statistiques ont permis une description et une caractérisation multicritère des modes de conduite actuels dominants et des alternatives plus rares. Ce travail a été utilisé, dans un deuxième temps, pour simuler, avec l'outil de programmation linéaire Coclick'eau, le territoire actuel (fréquence d'occurrence des cultures et de leurs itinéraires techniques au sein du territoire) ; ces résultats ont été discutés et validés en ateliers avec les acteurs locaux. Dans un troisième temps, les acteurs ont proposé et discuté différents objectifs ambitieux pour leur territoire, lors d'un atelier participatif. Puis, quatre scénarios contrastés ont été simulés avec l'outil Co-click'eau, en tenant compte de l'ensemble des informations collectées, des contraintes et objectifs identifiés dans les trois premières étapes. Dans les scénarios obtenus, la superficie consacrée aux légumineuses variait de 9 à 23%, contre 6% dans le territoire initial. Enfin, les résultats et les conditions de mise en œuvre de ces scénarios ont été discutés avec les parties prenantes lors d'un nouvel atelier participatif. Les scénarios se sont avérés être une bonne base de discussion pour de nouveaux leviers de réintroduction des légumineuses, en impliquant la diversité des acteurs concernés. Suite à cette étude, des projets de diversification ont été initiés sur le territoire.

CONTEXTE ET ENJEUX

La réintroduction des légumineuses est un enjeu majeur pour la transition écologique à l'échelle des territoires. Face aux impasses agronomiques de la succession colza-blé-orge, dominante sur le plateau de Langres, les acteurs de ce territoire se sont mobilisés pour étudier l'intérêt de scénarios de réintroduction des légumineuses, pour diversifier ces successions.

Ces scénarios sont l'aboutissement d'une démarche participative impliquant une vingtaine d'acteurs (agriculteurs, conseillers, coopératives, syndicat d'eau).

Cette démarche itérative a intégré 1) la description de situations culturelles (i.e. une culture, associée à un itinéraire technique dans un milieu) actuelles et innovantes et 2) la projection à l'échelle du territoire de scénarios faisant varier la proportion des situations culturelles décrites.



RÉSULTATS

Ces scénarios ont été simulés à l'aide de l'outil Co-click'eau, pour être évalués, sur la base d'indicateurs choisis avec les acteurs. La comparaison des valeurs initiales (pour valider la démarche) et simulées dans les scénarios a été discutée avec les acteurs. La démarche adoptée dans cette étude a produit quatre scénarios :

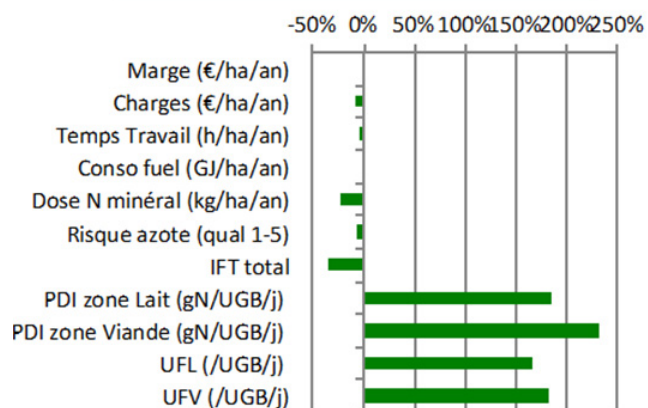
- S1 : développer la production de farine bio locale de haute qualité par un développement de l'agriculture biologique
- S2 : augmenter la production de fourrages et de cultures riches en protéines pour l'alimentation animale locale
- S3 : réduire l'impact des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau
- S4 : combiner les trois scénarios précédents (augmenter la superficie en agriculture biologique, en cultures fourragères et riches en protéines, et améliorer la qualité de l'eau).

Les simulations de ces quatre scénarios se caractérisent par une augmentation des surfaces en légumineuses, qui passent de 5,9% initialement à 15,1%, 22,8%, 8,8%, 15,3%, dans les scénarios 1, 2, 3 et 4, respectivement.

Les scénarios obtenus ont été discutés avec les acteurs, qui ont reconnu la nécessité de changements majeurs des systèmes de culture. Ils se sont accordés sur une orientation vers des productions de haute valeur ajoutée et la réintroduction de l'élevage, du fait du faible potentiel agronomique du territoire, en mobilisant une démarche collective.

Scénario 2 (↗ autonomie protéique)

Performances du territoire



PERSPECTIVES

Au-delà du succès local de la démarche, plusieurs enjeux méthodologiques sont apparus déterminants :

- mobiliser les acteurs à toutes les étapes de la démarche, y compris pour la collecte d'informations, pour les impliquer tout au long du projet, valider les paramètres de l'outil de simulation Co Click'eau et ainsi conduire à un diagnostic partagé.
- formuler la question initiale de manière consensuelle, propice à l'expression de tous les participants, a été déterminant pour initier la démarche.
- parvenir à un diagnostic territorial partagé, préalable à la poursuite d'une approche participative est une condition nécessaire pour que la phase de construction des scénarios soit la plus riche possible.

VALORISATION

A la suite de cette étude, certains acteurs ont mis en place des projets de développement local sur le territoire, reposant sur leur conviction que le futur du territoire dépend de sa capacité à se différencier sur la base de la qualité des produits (malteries bio, meuneries locales, etc.), de l'approche territoriale, ou encore à créer des synergies entre grandes cultures et élevage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Elise Pelzer, Mathilde Bonifazi, Marion Soulié, Laurence Guichard, Maude Quinio, Remy Ballot, Marie-Hélène Jeuffroy, 2020. Participatory design of agronomic scenarios for the reintroduction of legumes into a French territory, *Agricultural Systems*, 184, 102893

> Soulié M., Bonifazi M., Guichard L., Quinio M., Ballot R., Jeuffroy M.-H., Pelzer E., 2019. Co-conception et évaluation de scénarios agronomiques de réintroduction de légumineuses dans un territoire de Bourgogne. *Innovations agronomiques*, 74, 93-103



Contacts : Elise Pelzer, Rémy Ballot, Marie-Hélène Jeuffroy

Unité : UMR Agronomie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Ile-de-France Versailles-Grignon

Thèmes : Agroécologie, Société et territoire

Mots clés : Diversification, légumineuses, démarche participative, multi-acteurs



Rôle des prairies dans les systèmes de culture de demain

La diversification des systèmes de cultures arables est considérée comme un levier majeur pour accroître leur durabilité. Parmi les options possibles, l'introduction de prairies temporaires dans ces systèmes a reçu peu d'attention de la part de la communauté scientifique. Nous avons synthétisé les connaissances disponibles dans la littérature scientifique sur les services écosystémiques fournis par les prairies temporaires dans les systèmes de culture selon le type de prairie et les modes de gestion mis en œuvre. Nous en concluons que les prairies temporaires fournissent un large éventail de services pour l'agriculteur (conservation des sols, fourniture et recyclage des nutriments, rétention d'eau dans les sols, contrôle biologique des ravageurs et adventices) et pour la société (purification de l'eau, régulation du climat, fourniture d'habitats favorables à la conservation de la biodiversité, production de fourrage), à condition que leur insertion spatiale et temporelle dans les systèmes de culture soit bien gérée ; dans le cas contraire, on observe plutôt des disservices. Pour tirer parti de ces services écosystémiques et limiter les disservices, il conviendrait de modifier les programmes de sélection végétale pour qu'ils soient axés sur des mélanges d'espèces prairiales multi-services, de produire des connaissances sur les modalités innovantes d'introduction des prairies dans les systèmes de culture (comme couvert vivant semi-permanent par ex.) et de mieux quantifier les compromis entre services écosystémiques fournis par ces prairies dans les systèmes de culture.

CONTEXTE ET ENJEUX

L'introduction de prairies temporaires dans les systèmes de cultures arables est une option pour leur diversification, laquelle est jugée nécessaire pour accroître leur durabilité. Mais la communauté scientifique s'est peu saisie de cette option qui est même remise en cause par la plupart des scénarios proposant des solutions pour nourrir le monde de manière durable. Dans ces scénarios, les ruminants sont alimentés à partir de prairies permanentes situées dans des zones non arables, et les systèmes de culture sont entièrement dédiés à l'alimentation humaine. La diversification des systèmes de culture par l'introduction de prairies temporaires s'en trouverait donc compromise. Dans ce contexte, nous avons synthétisé les connaissances disponibles sur les services écosystémiques fournis par l'introduction de prairies temporaires dans les systèmes de culture selon le type de prairie et les modes de gestion mis en œuvre.

RÉSULTATS

Lorsque leur insertion spatiale et temporelle est adéquate, les prairies temporaires en rotation dans les systèmes de culture fournissent de multiples services à l'agriculteur (ou services intrants : conservation des sols, fourniture et recyclage des nutriments, rétention d'eau dans les sols, contrôle biologique des ravageurs et adventices) et à la société (purification de l'eau, régulation du climat, fourniture d'habitats favorables à la conservation de la biodiversité, production de fourrage). Sinon, des disservices sont constatés.

PERSPECTIVES

À quelques exceptions près, la sélection et l'évaluation des variétés sont effectuées en peuplements purs et sur



*Situations de systèmes de culture intégrant des prairies temporaires
©Sandra Novak pour a, b, d et e, SOERE ACBB pour c*

un nombre limité de traits et services. Une approche fonctionnelle considérant des mélanges d'espèces et de variétés semble nécessaire. Cela revient à modifier les programmes de sélection végétale pour qu'ils soient axés sur des prairies multi-services.

Si les modalités traditionnelles de semis et d'utilisation des prairies (fenaïson, pâturage) sont bien documentées dans la littérature, c'est beaucoup moins le cas pour les modalités émergentes (couvert vivant semi-permanent par ex.). Il est donc nécessaire d'améliorer nos connaissances sur ces innovations techniques et organisationnelles. S'il peut être admis, à l'issue de cette revue, que les prairies temporaires fournissent de nombreux services écosystémiques dans les systèmes de culture, il demeure difficile de répondre à la question des compromis entre ces services. Pour répondre à cette question, nous soulignons la nécessité d'approches multi-échelle (d'espace et de temps) intégrant l'effet des modes de gestion des prairies.

VALORISATION

- > Une collaboration inter-unités (AGIR, P3F, Ferlus, Agronomie, Agroécologie, SAS) et inter-départements (départements AgroEcoSystem, BAP, SPE) qui a permis de regrouper l'expertise nécessaire sur les prairies temporaires et sur une diversité de services écosystémiques
- > Une publication scientifique dans *Agronomy for Sustainable Development* et une présentation orale à la conférence Crop Diversification (Budapest, 19-21 Septembre 2019)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Martin, G., Durand, J.L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., Louarn, G., Médiène, S., Moreau, D., Valentin-Morison, M., Novak, S., Parnaudeau, V., Paschalidou, F., Vertès, F., Voisin, A.S., Cellier, P., Jeuffroy, M.H., 2020. Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40, 17
- > Martin, G., Durand, J.L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., Louarn, G., Médiène, S., Moreau, D., Valentin-Morison, M., Novak, S., Parnaudeau, V., Paschalidou, F., Vertès, F., Voisin, A.S., Cellier, P., Jeuffroy, M.H., 2019. Do tomorrow's diversified cropping systems need ley pastures? *Proceedings of the European Conference on Crop Diversification*, Budapest (Hongrie), 19-21 Septembre 2019, pp. 128-129



Contact : Guillaume Martin

Unité : UMR AGIR

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie Toulouse

Métapogramme : Ecoserv

Thèmes : Agroécologie, Changements globaux

Mots clés : Prairies temporaires, prairies multi-services, systèmes de culture, services écosystémiques, compromis entre services



Pour une meilleure comparaison entre agriculture biologique et conventionnelle

L'évaluation des effets environnementaux de l'agriculture et de l'alimentation fait l'objet de nombreuses études et est au cœur de nombreux débats. Cependant, la méthode d'analyse la plus largement utilisée néglige bien souvent certaines questions essentielles, telles que la biodiversité, la qualité des sols, les impacts des pesticides ou les changements sociétaux. Un chercheur d'INRAE et deux collègues suédois et danois rapportent dans la revue *Nature Sustainability* que ces oublis peuvent conduire à des conclusions erronées lorsqu'il s'agit de comparer agriculture conventionnelle et biologique.

CONTEXTE ET ENJEUX

La méthode la plus courante pour évaluer les impacts environnementaux de l'agriculture et de l'alimentation est l'analyse du cycle de vie (ACV). Des études utilisant cette méthode montrent parfois que l'agriculture biologique est pire vis-à-vis du climat par comparaison à l'agriculture conventionnelle car l'agriculture biologique produit des rendements plus faibles et utilise donc plus de terres pour compenser cela. Par exemple, c'est ce qu'a affirmé une étude récente publiée dans *Nature Communications*.

RÉSULTATS

Or, trois chercheurs français, danois et suédois, viennent de publier une analyse critique de nombreuses études d'ACV dans laquelle ils démontrent que cette mise en œuvre de l'ACV est trop simpliste et passe à côté d'avantages majeurs de l'agriculture biologique.

Dans un premier temps, leur analyse montre que les études d'ACV actuelles ne prennent que rarement en compte la biodiversité, qui est d'une importance cruciale pour la santé et la résilience des écosystèmes. Cependant, elle est en déclin dans le monde et l'agriculture conventionnelle s'est avérée être l'une des principales causes de tendances négatives observées, telles que le déclin des insectes et des oiseaux. L'agriculture occupe plus du tiers de la superficie terrestre mondiale. Tous les liens entre les pertes de biodiversité et l'agriculture sont donc extrêmement importants. Des études antérieures ont déjà montré que les champs conduits en agriculture biologique supportent des niveaux de biodiversité environ 30% plus élevés que les champs conduits en agriculture conventionnelle. De plus, entre 1990 et 2015 l'utilisation des pesticides dans le monde a augmenté de 73 % et les résidus de pesticides dans le sol, dans l'eau et dans les aliments peuvent être nocifs pour la santé humaine, les écosystèmes terrestres et aquatiques et causer une perte de biodiversité. L'agriculture biologique interdit l'utilisation de pesticides de synthèse. Mais peu d'études d'ACV tiennent compte de ces effets pour autant.

Par ailleurs, la dégradation des terres et la réduction de la qualité des sols résultant d'une gestion non durable des agroécosystèmes

constituent également un problème qui, encore une fois, est rarement considéré dans les études d'ACV. Les avantages des pratiques agricoles biologiques, telles que des rotations mobilisant une plus grande diversité de cultures et l'utilisation d'engrais organiques, sont paradoxalement souvent négligés dans les études d'ACV.

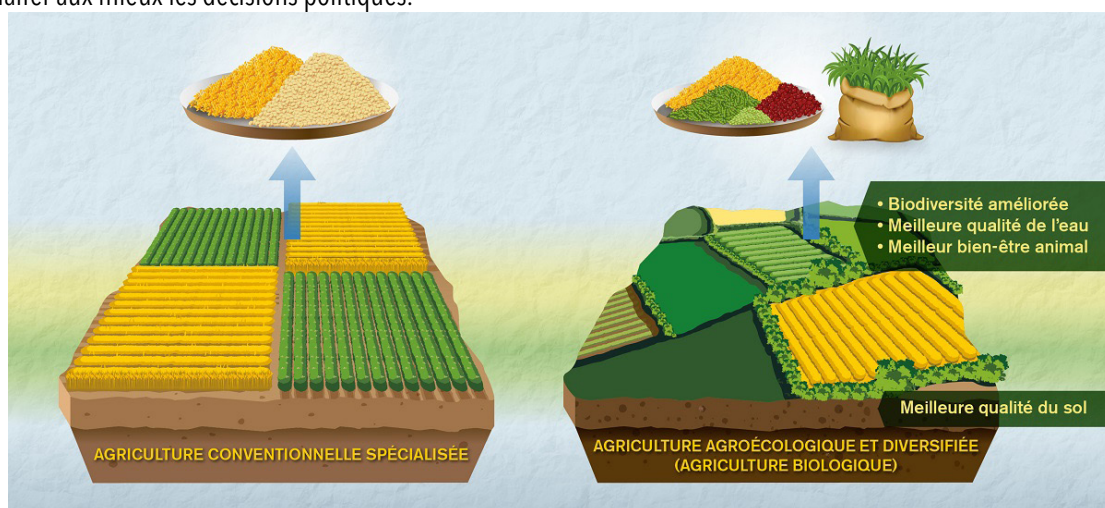
De manière cruciale, l'ACV évalue généralement les impacts environnementaux par kilogramme de produit. Cela favorise les systèmes intensifs conventionnels qui peuvent avoir des impacts plus faibles par kilogramme de produit, tout en ayant des impacts plus importants par hectare de terre. Par ailleurs, l'ACV devra mettre en œuvre une approche plus fine tenant compte des processus écologiques, adaptés aux caractéristiques locales des sols, du climat et de l'écosystème.

PERSPECTIVES

La méthodologie et les pratiques actuelles d'ACV ne sont tout simplement pas suffisantes pour évaluer les systèmes agroécologiques tels que l'agriculture biologique. Il faut donc améliorer l'ACV et l'intégrer à d'autres méthodes d'évaluation environnementale pour obtenir une image plus équilibrée et éclairer aux mieux les décisions politiques.

VALORISATION

> Communiqué de presse INRAE
<https://www.inrae.fr/actualites/meilleure-comparaison-entre-agriculture-biologique-conventionnelle>



RÉFÉRENCE

BIBLIOGRAPHIQUE

> Van der Werf, H.M.G., Trydeman Knudsen, M., Cederberg, C. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. Nature Sustainability (2020)
doi: 10.1038/s41893-020-0489-6

L'agriculture conventionnelle produit des rendements plus élevés, mais l'agriculture biologique offre d'autres avantages. © Yen Strandqvist / Chalmers Université de Technologie, Suède



Contact : Hayo van der Werf

Unité : UMR SAS

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Bretagne-Normandie

Thème : Agroécologie

Mots clés : Agriculture conventionnelle, agriculture biologique, ACV



Quels antagonismes et synergies entre services écosystémiques dans les systèmes de grande culture du Nord et du Centre de la France ?

Les écosystèmes contribuent directement ou indirectement au bien-être humain via les services écosystémiques (SE). Parmi les enjeux scientifiques de la recherche sur les SE, l'analyse des antagonismes ou synergies entre services et leurs déterminants demeure un défi pour la gestion durable des écosystèmes et des ressources naturelles. Aussi, après avoir développé une typologie et proposé des démarches d'analyses de ces relations sur la base d'une revue de la littérature scientifique, nous avons analysé, quantifié et cartographié les relations entre la production agricole (grande culture) et cinq SE clés rendus par les sols à l'agriculteur et la société, sur les plaines du Nord et du Centre de la France, cultivées en grandes cultures. Notre approche, fondée sur l'analyse d'arbres de régression multivariée, a mis en évidence l'effet positif des cultures intermédiaires sur la fourniture de plusieurs SE clés rendus par les sols comme la régulation de la qualité de l'eau, la fourniture d'azote aux plantes, la régulation du climat mais aussi, dans certaines situations, une réduction des flux d'eau alimentant les hydrosystèmes. Bien que les résultats de ce travail restent à affiner sur des situations de production spécifiques, ils offrent un premier niveau d'analyse des relations entre caractéristiques des situations de production agricole et bouquets de services et de biens.

CONTEXTE ET ENJEUX

Les écosystèmes contribuent directement ou indirectement au bien-être humain via les services écosystémiques (SE) (MEA, 2005) dont la compréhension du déterminisme constitue un enjeu de recherche majeur (Seppelt et al., 2011) en vue de leur gestion durable. En France, une évaluation des SE fournis par les écosystèmes agricoles a été conduite dans l'étude « EFESE-Ecosystèmes Agricoles » (EFESE-EA) (Therond et Tibi, 2018). Toutefois, les relations (antagonismes ou synergies) entre les SE, et leurs déterminants, ont été peu considérées dans l'étude, alors que leur identification constitue un enjeu primordial pour la gestion durable des écosystèmes agricoles et des ressources naturelles. Dans la continuité d'EFESE-EA, l'étude présentée ici a eu pour objectif (i) de réaliser une revue systématique des méthodes d'analyse des relations entre SE puis (ii) d'analyser et quantifier les relations entre la production agricole et cinq SE clés liés au fonctionnement du sol, rendus à l'agriculteur et la société : la fourniture en azote et le stockage et la restitution d'eau aux plantes cultivées (part de l'eau verte), le stockage et la restitution de l'eau bleue, la régulation de la qualité de l'eau et la régulation du climat global via le stockage du carbone dans les sols.

RÉSULTATS

Nous avons développé une classification des études sur les relations entre SE pour réaliser une revue des travaux existants. Cette classification permet de clarifier la nature des analyses spatiales et temporelles mises en œuvre, et distingue celles qui ont explicitement analysé les déterminants des relations entre SE. Nous avons ensuite développé une approche méthodologique originale pour analyser les relations entre les SE et leurs déterminants, basée sur l'analyse spatiale des sorties d'un arbre de régression multivariable. Via l'usage de cette approche sur le jeu de données EFESE-EA, ce travail a permis pour la première fois de cartographier les antagonismes et les synergies entre la production agricole et les SE liés au sol sur les plaines du Nord et du Centre de la France, cultivées en grandes cultures. Nous avons mis en évidence que la fréquence des couverts intermédiaires dans la rotation culturale est le facteur d'ordre 1 qui détermine les relations entre les SE étudiés. Nous avons également montré une forte disparité des relations entre SE selon les systèmes de culture et selon certaines propriétés clés du sol, en particulier le pH et le Réservoir Utilisable. Selon les territoires, la fréquence des couverts intermédiaires

et ces propriétés du sol, un antagonisme plus ou moins marqué peut apparaître entre les deux services liés à l'eau que sont l'eau verte et l'eau bleue. Ces deux services étant rendus à des bénéficiaires différenciés (service d'eau verte rendu à l'agriculteur et service d'eau bleue rendu à la société), cette étude ouvre des pistes pour la gestion opérationnelle de l'eau dans les territoires agricoles.

PERSPECTIVES

Résultats de la quantification des relations entre des services écosystémiques liés au fonctionnement du sol, basés sur l'analyse des sorties d'un arbre de régression multivariable et leur distribution spatiale. Adapté de Science of The Total Environment 10.1016/j.scitotenv.2020.142815

Dans la continuité de ce travail, nous analysons actuellement, de manière plus ciblée, sur le territoire de la Beauce, les effets des types de cultures intermédiaires et de modes de gestion associés sur les relations entre SE et la production agricole.

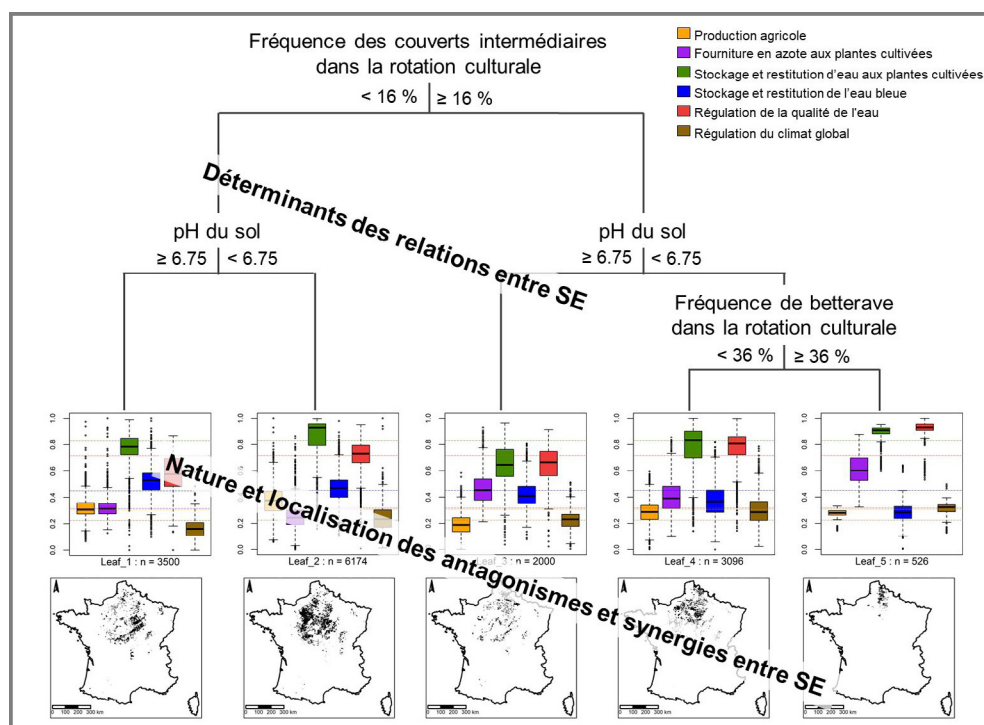
VALORISATION

Ce travail a donné lieu à deux publications et deux présentations dans des colloques internationaux (Sfécologie2018 et Wageningen Soil Conference 2019).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Obiang Ndong G., Therond O., Cousin I., 2020. Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature. Ecosystem Services. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101120

> Obiang Ndong G., Villerd J., Cousin I., Therond O., 2020-21. Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: Application to the main cropping area in France. Science of the Total Environment. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142815



Contacts : Isabelle Cousin, Olivier Therond

Unités : UR SOLS, UMR LAE

Département : AgroEcoSystem

Centres INRAE : Val de Loire, Grand Est-Colmar

Thème : Agroécologie

Métaprogramme : BioseFair

Mots clés : Services écosystémiques, sol, systèmes de culture, antagonisme, bassin parisien de production



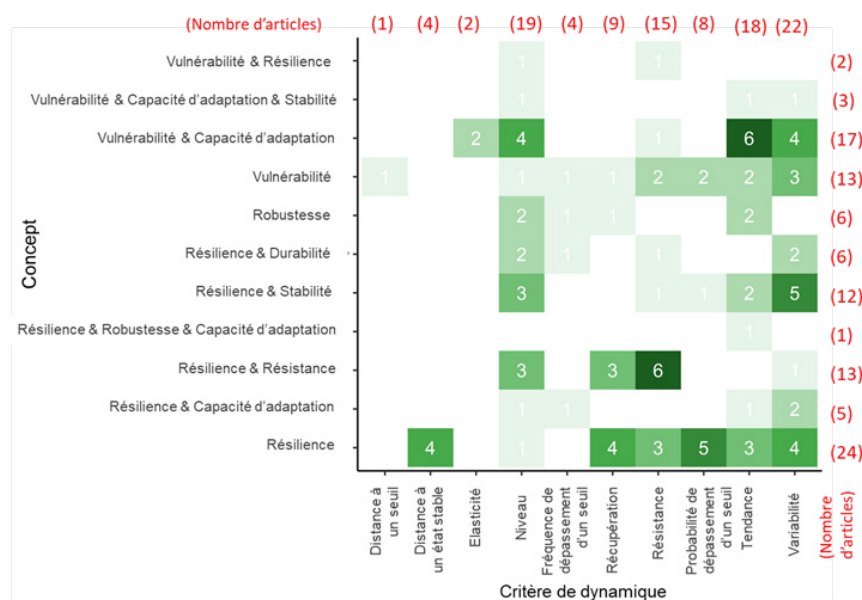
Résilience, vulnérabilité et robustesse des systèmes agricoles tempérés

Dans un contexte global d'accélération des changements climatiques et de fluctuation des marchés économiques, l'identification des facteurs de vulnérabilité ou résilience des systèmes agricoles de grandes cultures est devenu un enjeu majeur afin d'assurer la durabilité des filières de production.

Cependant, il n'existait pas de synthèse structurée sur la nature des approches opérationnelles d'évaluation de la dynamique des performances des systèmes agricoles ni sur les connaissances qui en sont issues. Aussi, dans le cadre d'une thèse CIFRE Agrosolutions, nous avons développé puis appliqué un cadre d'analyse générique pour effectuer une synthèse systématique de ces approches opérationnelles quel que soit le cadre conceptuel utilisé : Vulnérabilité, Résilience, Robustesse (VRR). La description d'une part des systèmes étudiés et des méthodes utilisées et d'autre part des connaissances générées sur les facteurs de VRR ont été formalisées dans 2 articles de revue. Tout d'abord, nous montrons que l'intensification et la diversification de la production ne sont pas des facteurs systématiques de VRR et qu'il est nécessaire d'adapter la diversité fonctionnelle aux pratiques agricoles, au pédoclimat et à la disponibilité des ressources locales pour assurer une VRR à court et long terme. Ensuite, nous présentons la diversité de méthodes et critères d'analyse de la dynamique utilisés et la nécessité de développer des approches multicritères dépassant la seule analyse de la robustesse du rendement.

CONTEXTE ET ENJEUX

Dans un contexte global d'accélération des changements climatiques et de fluctuation des marchés économiques, l'identification des facteurs de vulnérabilité, résilience ou robustesse (VRR) des systèmes agricoles de grandes cultures est devenu un enjeu majeur afin d'assurer la durabilité des filières de production. L'étude de la VRR, qui consiste à analyser la dynamique des performances d'un système sujet à des perturbations biophysiques ou socioéconomiques, a connu un essor important ces dernières années aboutissant à la production de nombreux cadres conceptuels et travaux d'évaluation. Cependant, la multiplicité des cadres conceptuels et des méthodes d'évaluation utilisées rend difficile la production de connaissances génériques et actionnables sur les facteurs de VRR des systèmes agricoles alors même que les enjeux de résilience des systèmes agricoles, et plus largement des systèmes alimentaires, sont de plus en plus prégnants.



Critères descriptifs de la dynamique des systèmes utilisés en fonction du concept étudié pour analyser la vulnérabilité, résilience et robustesse des systèmes agricoles en climat tempéré (traduit de Dardonville et al., 2021)

RÉSULTATS

Dans le cadre de la thèse de Manon Dardonville (CIFRE Agrosolutions), nous avons réalisé deux synthèses (reviews) systématiques des études évaluant la VRR des systèmes agricoles des zones tempérées. Grâce à une méthode de visualisation des réseaux bibliométriques dans la base de données Web of Science et un cadre d'analyse générique nous avons identifié puis caractérisé 53 études conduisant une évaluation quantitative de la Vulnérabilité, Résilience et/ou Robustesse (VRR) des systèmes agricoles. Dans une première revue de littérature, nous montrons que la diversification, largement considérée comme un facteur de résilience, est associée à une résilience du rendement des cultures, mais ne contribue pas systématiquement à la résilience de la productivité des prairies (par ex. associée à une faible résistance aux sécheresses). Au-delà de la diversité taxonomique, il faut alors considérer la diversité fonctionnelle et les effets de composition liés à la présence de certaines espèces particulières pour expliquer la résilience des systèmes. Nous montrons également que l'intensification (artificialisation des milieux) n'est pas non plus toujours gage de résilience puisque les effets sont variables et liés aux pratiques agricoles, au pédoclimat et à la disponibilité des ressources locales. Dans la seconde synthèse, nous présentons la diversité des méthodes et critères d'analyse de la dynamique utilisés (voir Figure). Nous démontrons que les études peuvent conduire des analyses de la dynamique des performances similaires (même critère de dynamique) alors qu'elles mobilisent des concepts de référence différents. Nous concluons en insistant sur la nécessité de développer des approches multicritères pour décrire plusieurs facettes de la dynamique mais aussi multi-performances dépassant la seule analyse du rendement.

PERSPECTIVES

Les enseignements de ces travaux de review sont actuellement utilisés au sein de l'UMR LAE pour conduire une évaluation de la VRR des systèmes de grandes cultures de la région Grand-Est et d'un système culture élevage territorialisé en Vendée. Ils ont également permis le développement d'une collaboration avec le laboratoire Plant Production System à Wageningen University & Research qui vise au développement d'une nouvelle méthode d'évaluation et à la réalisation de cas d'étude en Europe.

VALORISATION

Ce travail, réalisé dans le cadre de la thèse de Manon Dardonville, a abouti à la publication de deux articles de revue et a fait l'objet de présentations lors de conférences nationales et internationales.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

> Dardonville, M., Urruty, N., Bockstaller, C., Therond, O., 2020. Influence of diversity and intensification level on vulnerability, resilience and robustness of agricultural systems. *Agricultural Systems* 184, 102913.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102913>

> Dardonville, M., Bockstaller, C., Therond, O., 2021. Review of quantitative evaluations of the resilience, vulnerability, robustness and adaptive capacity of temperate agricultural systems. *Journal of Cleaner Production* 125456.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125456>



Contacts : Manon Dardonville, Olivier Théron

Unité : UMR LAE

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Grand-Est Colmar

Thèmes : Changements globaux, Biodiversité

Mots clés : diversification, intensification, système de culture, dynamique, évaluation



Le premier modèle prenant en compte les effets des principaux facteurs abiotiques et biotiques sous l'effet des pratiques culturales et de leurs interactions sur la qualité d'implantation des cultures semées

Un grand nombre de facteurs abiotiques et biotiques sous l'effet du système de culture et du pédo-climat affectent la qualité d'implantation des cultures semées. Cependant, il est extrêmement difficile de prendre en compte tous ces facteurs en utilisant une approche expérimentale. Plusieurs modèles ont été développés pour simuler la levée des cultures, mais ils ne prennent en compte qu'un petit nombre de facteurs, soit abiotiques uniquement, soit biotiques uniquement. Le développement d'un modèle qui prendrait en compte l'ensemble des principaux facteurs biotiques et abiotiques sous l'effet des pratiques culturales et du pédoclimat serait utile pour aider à assurer la maîtrise de l'implantation des cultures. En tenant compte de ces éléments, un modèle générique appelé Crop Establishment SIMulator (CESIM) a été développé par des chercheurs de l'UMR AGIR , en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Perth (Western Australia). Le travail a été publié dans la revue Phytobiomes édité par la société américaine de phytopathologie. Ce modèle prend en compte les pratiques culturales, les caractéristiques des semences et des plantules, les composants physico-chimiques et biologiques du lit de semences, le climat, ainsi que leurs interactions. En plus de prédire le taux final d'émergence, le modèle prend également en compte les dommages post-émergence tels que ceux causés par les oiseaux, un stress biotique important pour des cultures comme le tournesol ou le soja.

CONTEXTE ET ENJEUX

Au cours de ce siècle, les acteurs du monde agricole doivent relever un défi quadruple : augmenter la production agricole à l'échelle globale, réduire les impacts négatifs de l'agriculture, assurer des revenus satisfaisants aux agriculteurs, et adapter les pratiques au changement climatique en cours. Ces défis, qui concernent le monde entier, peuvent être relevés grâce à une approche holistique et il n'existe pas d'outil de simulation qui intègre les principaux facteurs abiotiques et biotiques affectant l'implantation des cultures. Le développement d'un outil de simulation facilitera considérablement l'adaptation des pratiques pour limiter le risque d'échec d'implantation.

RÉSULTATS

CESIM est un modèle générique unique et original capable de prendre en compte un grand nombre de variables et leurs interactions pour prédire la qualité d'implantation des cultures. Ce modèle est flexible, transparent, convivial et convient donc aussi bien aux utilisateurs académiques qu'aux praticiens, notamment les conseillers agricoles. CESIM peut être utilisé dans une large gamme de situations de production, non seulement pour effectuer l'évaluation *ex ante* de la qualité d'implantation d'une culture donnée, mais aussi pour réaliser des diagnostics *ex post*.

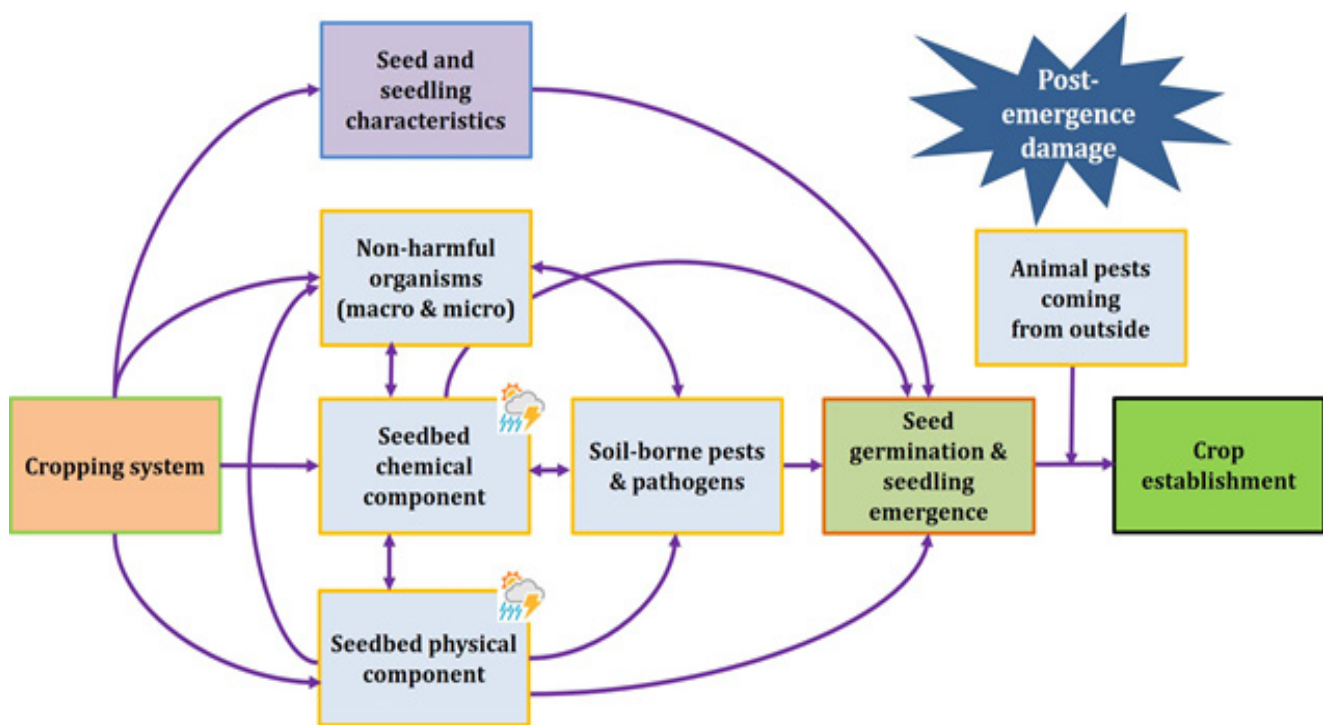


Schéma conceptuel des déterminants de la qualité d'implantation des cultures (d'après Lamichhane et al 2020)

PERSPECTIVES

Le modèle conceptuel sous-jacent au modèle CESIM sera utilisé comme socle pour générer une base de données qui pourra être utilisée pour le développement d'autres approches de modélisation, complémentaires, cette fois-ci dynamiques et quantitatives.

VALORISATION

Ce travail a été publié dans la revue *Phytobiomes Journal*.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

> Lamichhane JR, You MP, Barbeti MJ, Aubertot J-N (2020) Crop Establishment SIMulator: a qualitative aggregative model to predict the role of phytobiomes on field crop establishment. *Phytobiomes J*. doi: 10.1094/PBIOMES-05-20-0036-R



Contact : Jay Ram Lamichhane

Unité : UMR AGIR

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Occitanie-Toulouse

Thème : Agroécologie

Métaprogrammes : SuMCrop, ACCAF

Mots clés : Semences, semis, phytobiome, levée des cultures, modélisation qualitative, DEXi

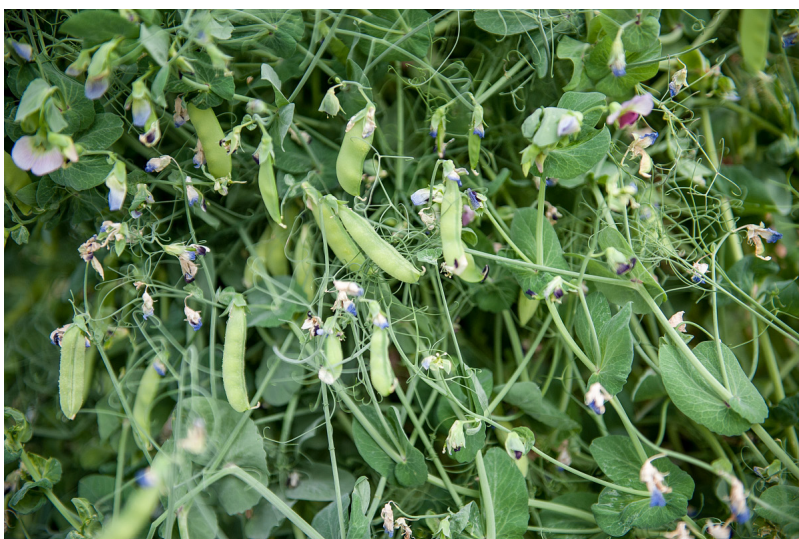


Une synthèse quantitative de connaissances à l'échelle mondiale révèle des effets positifs de la diversification des systèmes de culture sur les rendements et l'environnement

La diversification des systèmes de culture englobe différentes stratégies qui peuvent contribuer à maintenir ou renforcer la durabilité de l'agriculture. Des milliers d'expérimentations ont été réalisées dans le monde depuis près de cinq décennies pour évaluer et comparer les performances de diverses méthodes de diversification dans un large éventail d'agroécosystèmes et de climats. Cependant, jusqu'à présent, cet ensemble de données n'a pas fait l'objet d'une synthèse systématique. Dans ce travail, nous avons identifié et analysé 99 méta-analyses résumant les résultats de plus de 3700 expériences agronomiques couvrant sept stratégies de diversification des cultures. Parmi ces stratégies, la rotation et les espèces végétales associées sont dominantes dans la littérature, suivies par les cultures intermédiaires, l'agroforesterie et l'hétérogénéité des paysages. Notre analyse révèle que la rotation des cultures et les associations conduisent souvent à des augmentations de rendement. L'agroforesterie induit quasi systématiquement une amélioration de la biodiversité et de la qualité des sols - en particulier le carbone organique des sols. Dans ce contexte, la combinaison de plusieurs stratégies de diversification est plus performante que toute stratégie individuelle. Par ailleurs, notre étude révèle qu'il subsiste un important déficit de connaissances, notamment en ce qui concerne l'utilisation de l'eau, la rentabilité économique, la qualité des produits et la stabilité de la production. Peu de méta-analyses examinent les performances de l'hétérogénéité des paysages et des systèmes avec des espèces autres que les céréales et les légumineuses. La base de données utilisée pour cette synthèse systématique est en accès libre.

CONTEXTE ET ENJEU

Alors que la simplification de systèmes de culture combinée à un important recours aux intrants chimiques caractérisent les systèmes agricoles les plus intensifs, il est capital de pouvoir caractériser les performances multicritères des systèmes plus diversifiés. Ces systèmes se caractérisent par une agrobiodiversité accrue soit dans des rotations plus longues, des associations de cultures, des cultures intermédiaires, de l'agroforesterie. À ce jour, malgré l'existence de plusieurs méta-analyses, l'ensemble des résultats expérimentaux disponibles n'a pas fait l'objet d'une synthèse globale ; en outre la qualité de certaines méta-analyses pose question. Pour progresser, nous avons procédé à une synthèse de 99 méta-analyses sur la diversification des cultures à l'échelle mondiale, réalisé une analyse de leur qualité, et mis à disposition la base de données utilisée en accès libre.



RÉSULTATS

Les performances écologiques et agronomiques des stratégies de diversification des cultures dépendent du contexte (Duru et Therond 2015). Cependant, notre synthèse systématique révèle qu'une majorité des estimations quantitatives reportées dans la littérature soutiennent l'idée que certaines stratégies de diversification ont des impacts positifs sur la production et plusieurs variables environnementales, en particulier dans les systèmes de culture du riz, du maïs et du blé, qui représentent 34% des espèces mentionnées dans les études primaires. Plus précisément, nos résultats montrent clairement que certaines stratégies de diversification des cultures peuvent accroître la biodiversité associée. Plus de 75 % des estimations analysées montrent un effet positif sur la biodiversité. L'impact de l'agroforesterie est particulièrement fort avec une augmentation de la biodiversité de plus de 25% dans la plupart des cas. Nos résultats révèlent également qu'une majorité des estimations analysées indiquent un impact positif sur le rendement des cultures. Cet impact positif concerne presque toutes les stratégies de diversification, sauf une, l'agroforesterie, pour laquelle le rendement est plus variable. Cependant, l'agroforesterie a presque systématiquement un impact positif sur la qualité des sols, en particulier sur le carbone organique du sol, confirmant son rôle important dans l'atténuation du changement climatique. Nous avons constaté que la combinaison de plusieurs stratégies de diversification des cultures, en particulier la rotation combinée avec l'agroforesterie ou la rotation combinée avec des plantes associées, améliore les performances productives des systèmes diversifiés. Néanmoins, cette étude qui pour la première fois évalue les bénéfices d'un large panel de manière de diversifier les systèmes de culture, révèle plusieurs trous de connaissance sur l'impact sur la qualité des produits, l'usage de l'eau et le bénéfice en revenu pour les agriculteurs.

PERSPECTIVES

L'estimation de l'effet de la diversification des systèmes sur la qualité des produits, de l'utilisation de l'eau et des performances économiques dans des systèmes diversifiés nécessite de nouvelles données quantitatives, car ces questions ont fait l'objet de peu d'études, jusqu'à présent. Notre analyse révèle également qu'un effort collectif est nécessaire pour améliorer la qualité des méta-analyses agronomiques, car 46% de nos critères de qualité ne sont pas remplis en moyenne. Les travaux en cours et futurs visent à répondre à ces nouvelles problématiques.

VALORISATION

Deux articles scientifiques ont été publiés et une base de données a été mise à disposition en accès libre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- > Beillouin D., Ben-Ari T., Makowski D. 2019. Evidence map of crop diversification strategies at the global scale. *Environmental Research Letters* 14, 123001. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4449
- > Beillouin D, Ben-Ari T and Makowski D 2019 A global dataset of meta-analyses on crop diversification at the global scale *Data Brief* 24 103898



Contacts : Muriel Valantin Morison & David Makowski

Unité : UMR Agronomie

Département : AgroEcoSystem

Centre INRAE : Ile-de-France - Versailles-Grignon

Thèmes : Agroécologie, Changements globaux

Mots clés : Méta-analyse, diversification, rotation, associations d'espèces, agroforesterie, performances agroécologiques



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