

PSDR4 PROLEG - Les produits résiduels organiques et les légumineuses pour des systèmes de cultures innovants plus sobres en engrais de synthèse et multiservices

Levavasseur F.¹, Dion C.², Girardin C.¹, Goubard Y.¹, Lardos M.¹, Maillet G.³, Martinez M.⁴, Moinard V.¹, Reau R.³, Schneider A.⁵, Spaak D.⁶, Houot S.¹

¹ UMR ECOSYS, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Av. Lucien Bretignières, F-78850 Thiverval-Grignon

² Chambre d'agriculture régionale d'Ile-de-France, Service Agronomie, 19 rue d'Anjou, F-75 008 Paris

³ UMR Agronomie, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Av. Lucien Bretignières, F-78850 Thiverval-Grignon

⁴ Association patrimoniale de la plaine de Versailles, F-78810 Feucherolles

⁵ Terres Inovia, F-78850 Thiverval-Grignon

⁶ Terre et Cité, F-91430 Igny

Correspondance : florent.levavasseur@inrae.fr, sabine.houot@inrae.fr

Résumé

L'agriculture périurbaine francilienne est tournée vers les grandes cultures et dépendante des fertilisants minéraux. Les sols sont souvent appauvris en matière organique et leur fertilité peut s'en trouver affectée. La proximité de la ville offre des opportunités de recyclage de produits résiduels organiques (PRO) pour améliorer l'autonomie des exploitations et la fertilité des sols. L'introduction de davantage de légumineuses pourrait également participer à ces améliorations. Dans ce contexte, l'objectif du projet PROLEG était de proposer des systèmes de culture mobilisant les PRO et les légumineuses, pour améliorer l'autonomie vis-à-vis des engrais minéraux, tout en maximisant les services rendus par ces systèmes. Un inventaire des PRO du territoire a été réalisé, pointant le potentiel des PRO pour répondre aux besoins de l'agriculture. L'acquisition de connaissances au champ et au laboratoire sur les effets des PRO et des légumineuses, ainsi qu'une synthèse des connaissances existantes a permis de mieux guider l'usage de ces ressources. Un outil d'évaluation multicritère a été développé pour estimer les performances des systèmes de culture à court et long terme, en intégrant les spécificités des PRO et des légumineuses. Enfin, des ateliers de co-conception appuyés par l'outil d'évaluation ont permis de proposer des systèmes de culture répondant aux objectifs des agriculteurs en termes d'autonomie ou de fertilité de leur sol.

Mots-clés : Systèmes de culture, Autonomie N, Recyclage, Multicritère, Périurbain

Abstract: Organic waste products and legume crops for innovative cropping systems less dependent on synthetic fertilizers and providing ecosystem services

Agriculture in the Ile-de-France region is dominated by arable crops production and dependent on mineral fertilizers. Soils are often impoverished in organic matter and their fertility can be affected. The proximity to the city offers opportunities for recycling organic waste products (OWP) to improve farm autonomy and soil fertility. The introduction of more legume crops could also contribute to these improvements. In this context, the objective of the PROLEG project was to propose cropping systems mobilizing OWP and legumes, to improve farm autonomy regarding mineral fertilizers, while maximizing the services provided by these systems. An inventory of OWPs in the territory was carried out, pointing out the potential of OWPs to meet the needs of agriculture. New experiments in the field and in the laboratory on the effects of OWPs and legumes, as well as a synthesis of existing knowledge, has made it possible to better guide

the use of these resources. A multicriteria evaluation tool has been developed to estimate the performance of short and long term cropping systems, by integrating the specificities of OWPs and legumes. Finally, co-design workshops supported by the evaluation tool made it possible to propose cropping systems that meet the objectives of farmers in terms of autonomy or fertility of their soil.

Keywords: Cropping systems, N autonomy, Recycling, Multicriteria, Periurban.

Introduction

1.1 Contexte et objectifs

Outre la pression foncière exercée sur les sols, le maintien des activités agricoles dans le contexte péri-urbain francilien est très dépendant des conditions de cohabitation des activités. Le contexte périurbain génère des opportunités d'adaptation des modes de production permettant de réduire les impacts de l'agriculture et de favoriser des services rendus par les agroécosystèmes (production, recyclage matière...). Le cas des éléments fertilisants, en particulier de l'azote est emblématique du fait de son importance dans la productivité agricole et des impacts associés, que ce soit la contamination des ressources en eau, la pollution de l'air ou les émissions de gaz à effet de serre. La réduction des impacts passe par la conception de systèmes de production plus autonomes, s'appuyant sur des sols fertiles mobilisant davantage les services écosystémiques, pour réduire l'utilisation des intrants de synthèse (azote minéral en particulier), ce qui implique une plus large utilisation de l'azote organique.

Dans ce contexte, l'agriculture francilienne peut s'appuyer sur une meilleure utilisation des ressources organiques disponibles et sur l'intensification des échanges à l'échelle territoriale : effluents d'élevage importés des régions excédentaires (compost de fumier, lisier séché), digestats issus de la méthanisation pour la production d'énergie, produits issus des activités urbaines (boues de STEP, composts de déchets verts ou de déchets urbains). Les valeurs fertilisantes azotées des produits résiduels organiques (PRO) à court terme sont relativement bien connues pour les effluents d'élevage (Gutser et al., 2005), les boues d'épuration et les effluents agro-industriels (Parnaudeau et al., 2006 ; 2004), mais sont en partie manquantes pour des nouveaux PRO (digestats par exemple). En fonction du degré de stabilité de la matière organique des PRO, leur apport fournira plus ou moins d'azote à la culture l'année de leur apport ou contribuera à l'amélioration de la fourniture en N par le sol pour les années suivantes via l'augmentation de matière organique du sol (Chalhoub et al., 2013 ; Gómez-Muñoz et al., 2017). Outre leur valeur fertilisante, les PRO augmentent les stocks de carbone dans les sols (Peltre et al., 2012) et peuvent ainsi améliorer les propriétés physiques et biologiques des sols (Obriot et al., 2016). Par ailleurs, les PRO, et notamment ceux issus d'effluents d'élevage, sont souvent riches en phosphore et leur gestion, au sein des agrosystèmes, doit en tenir compte. Enfin, l'utilisation des PRO, en particulier ceux issus des déchets urbains, pose des questions en termes de risque de pollution par les éléments-traces et les contaminants organiques (Fijalkowski et al., 2017).

L'introduction des légumineuses dans les systèmes de culture permet également d'accroître l'autonomie azotée des systèmes, tout en fournissant d'autres services (biodiversité...) (Schneider et Huyghe, 2015). La part des légumineuses dans les systèmes de culture franciliens restent cependant marginale depuis de nombreuses années pour diverses raisons (Meynard et al., 2013). On assiste néanmoins à une progression des légumineuses dans les couverts végétaux d'interculture afin de maximiser les bénéfices de cette obligation réglementaire (fourniture de N). Des initiatives locales de circuits courts de légumineuses à graines (lentille, pois chiche) apparaissent également pour alimenter les cantines du territoire par exemple.

Afin de proposer des modes innovants d'introduction des PRO et des légumineuses dans les systèmes de culture, il est possible de procéder par co-conception avec les agriculteurs motivés par les questions d'autonomie N et de fertilité des sols (Reau et al., 2019). Cette méthode permet d'aboutir à des façons de cultiver répondant à des défis ambitieux tout en sortant des sentiers battus. Un des défis reste cependant d'évaluer si les systèmes proposés répondent effectivement aux objectifs fixés par les agriculteurs. Tous les systèmes ne pouvant être testés au champ, il est nécessaire de disposer d'outils de scénarisation et d'évaluation ex ante des systèmes de culture. Certains modèles mécanistes, comme STICS (Brisson et al., 2008), permettent de simuler les dynamiques de l'eau et de l'azote dans le continuum sol-plante-atmosphère. D'autres modèles simulent l'évolution des stocks de matière organique dans les sols comme AMG (Andriulo et al., 1999). Par ailleurs, des indicateurs de qualité des sols sont développés pour comparer des pratiques culturales ou modes d'utilisation des sols (Nakajima et al., 2015). Mais ces modèles, outils ou indices donnent des informations fragmentaires, ne disposent pas ou peu de références pour être appliqués aux systèmes de culture incluant des PRO ou des légumineuses. Ils ne sont par ailleurs jamais utilisés simultanément alors qu'ils apportent des informations complémentaires sur les services rendus par les systèmes de culture ou les impacts associés. Un outil permettant d'évaluer simultanément différentes performances des systèmes de cultures et considérant les effets des PRO et des légumineuses reste donc à proposer.

Dans ce contexte, le projet PSDR4 PROLEG avait différents objectifs :

- Poursuivre l'acquisition de connaissances sur les effets des PRO et des légumineuses et capitaliser avec l'existant,
- Elaborer un outil multicritère d'évaluation des performances des systèmes de culture, adapté à la considération des effets des PRO et des légumineuses,
- Proposer des systèmes de culture adaptés aux conditions du territoire, intensifiant l'usage des PRO et des légumineuses pour répondre aux objectifs des agriculteurs en termes de fertilité de leur sol et maximisant les services rendus et limitant les impacts.

1.2 Territoires d'étude et partenariat

Le projet PROLEG était ancré sur deux petits territoires périurbains franciliens, la plaine de Versailles et le plateau de Saclay (Figure 1). Ces deux territoires présentent des caractéristiques communes : premières terres agricoles à l'ouest et au sud de la métropole parisienne, agriculture orientée majoritairement vers les grandes cultures et un mode de production conventionnel (avec cependant un essor récent de l'agriculture biologique), gisements de PRO urbains (composts de déchets verts, fumier de cheval, boue de STEP).

Du point de vue partenarial, ces deux territoires présentent la particularité d'être animés par deux associations territoriales : l'association de la Plaine de Versailles et Terre et Cité pour le plateau de Saclay. Ces deux associations, partenaires du projet, ont des objectifs communs de préservation, de valorisation et de développement de l'activité agricole, ainsi que de favoriser les échanges entre acteurs agricoles et non agricoles. La question de la fertilité des sols et du recyclage des PRO fait donc partie de leurs intérêts. Au-delà de ces deux associations, le projet rassemble plusieurs autres partenaires : chambre d'agriculture d'Ile-de-France, producteurs de PRO (plateforme de compostage, station d'épuration), institut technique (Terres Inovia), collectivités.

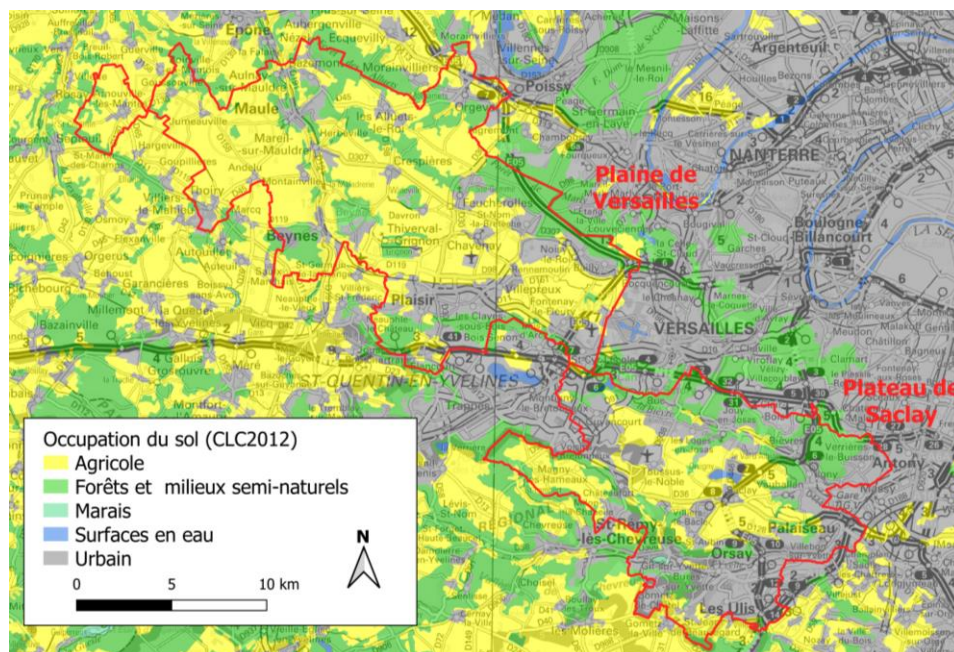


Figure 1: Localisation et occupation du sol des deux territoires d'étude en limite de la métropole parisienne.

1.3 Méthodes

Les méthodes mises en œuvre au cours du projet ont été multiples :

- Réalisation d'enquêtes d'acteurs du territoire (agriculteurs, producteurs de PRO, collectivités...) pour identifier les PRO du territoire, leur gestion actuelle, ainsi que leurs objectifs et contraintes et les effets des PRO et des LEG à considérer,
- Reconstruction des flux de PRO sur le territoire et estimation de leur contribution actuelle et potentielle aux besoins en nutriments de l'agriculture du territoire (travaux communs avec le projet ADEME PROTERR),
- Acquisition de nouvelles références sur les effets des PRO et des LEG au laboratoire et au champ, qui ont permis également d'animer plus concrètement les interactions avec les acteurs du territoire (travaux cofinancés par le programme LEADER du plateau de Saclay et en commun avec le projet ADEME Agrocapi pour le volet urine),
- Développement d'un outil d'évaluation multicritère pour évaluer les performances agro-environnementales des systèmes de culture mobilisant des PRO et des LEG,
- Réalisation d'ateliers de co-conception avec les agriculteurs du territoire de système de culture répondant à des objectifs de fertilité des sols, en mobilisant notamment les PRO et les LEG.

2. Principaux résultats obtenus

Concernant les résultats expérimentaux du projet, seuls ceux correspondant aux valeurs agronomiques des PRO sont présentés ici, bien que le projet ait également contribué à acquérir des connaissances sur la disponibilité des contaminants dans les PRO (Cambier et al., 2019), sur les effets précédents des légumineuses (Schneider et al., 2018) ainsi que sur les effets des légumineuses sur l'activité biologique des sols (stage C. Rossignol). Les résultats d'enquête d'acteurs ne sont également pas présentés ici. Le développement de l'outil d'évaluation multicritère et la co-conception de système de culture sont présentés.

2.1 Une grande diversité de la minéralisation du C et du N des PRO caractérisée au laboratoire

Plus de 30 PRO du territoire ont été échantillonnés et analysés pour caractériser leur efficacité fertilisante et amendante. Afin de comparer dans des conditions standardisées la contribution des PRO à la matière organique du sol et à la fourniture d'azote minéral, des incubations de laboratoire de mélange sol et PRO ont été réalisées, incubations durant lesquelles le C et le N minéralisés au cours du temps sont suivis régulièrement. En addition à la réalisation de nouvelles analyses, notamment sur des PRO encore peu étudiés (digestats par exemple), une synthèse des données d'incubations disponibles à INRAE et auprès de ces partenaires a également été entreprise au cours du projet (Levavasseur et al., 2021b). Cette synthèse permet de comparer facilement le potentiel de stockage de carbone entre différents groupes de PRO et la variabilité au sein d'un même groupe (Figure 2).

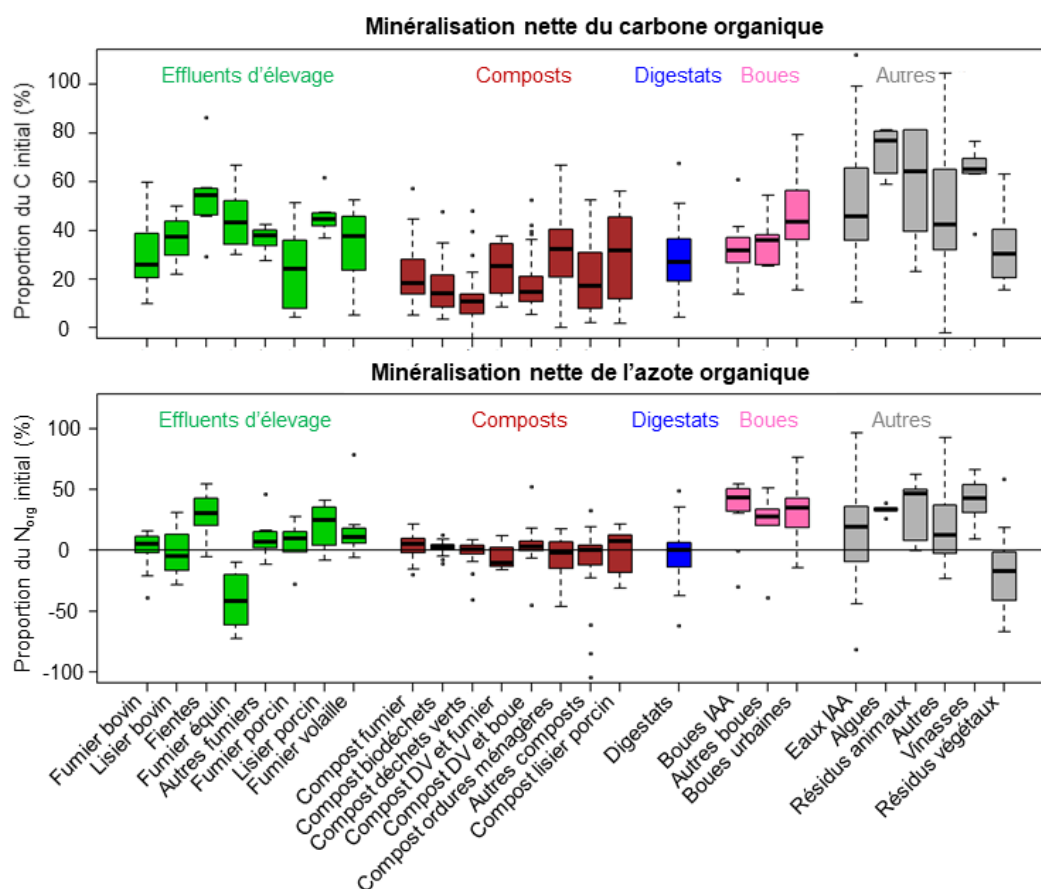


Figure 2: Minéralisation nette du carbone organique et de l'azote organique des PRO durant une période d'incubation au laboratoire équivalente à un an champ. Adapté de Levavasseur et al. (2021b).

Plus la minéralisation du carbone est faible, plus le potentiel de stockage à quantité de carbone égale est élevé. Ainsi, les composts présentent globalement le potentiel de stockage le plus élevé (18% de C minéralisé), suivi des digestats (27%), des effluents d'élevage (37%) et des boues (40%). Des différences importantes existent au sein d'un groupe de PRO (54% et 30% de C minéralisé pour les fientes et fumiers bovins respectivement au sein des effluents d'élevage) et pour un même type de PRO (47% de coefficient de variation pour les digestats par exemple). Cette synthèse a également permis de quantifier la contribution de la minéralisation de l'azote organique des PRO à leur valeur fertilisante azotée. La plupart des PRO montre une minéralisation relativement limitée (par exemple, respectivement 3%, 3%, -1%, -2% pour les fumiers bovins, composts de fumiers, composts de déchets verts et digestats), quoique variable (entre -50% et +50% pour les digestats environ). La minéralisation pour certains PRO est

cependant significative, avec par exemple 30%, 20%, 32% et 41% pour les fientes, lisiers porcins, boues urbaines et vinasses de sucrerie, respectivement. Enfin, les seuls PRO à provoquer une forte immobilisation nette d'azote sont les fumiers de chevaux et les résidus végétaux (écorces...), avec respectivement -41% et -27%. En croisant ces résultats avec les teneurs en C, N minéral et N organique des PRO, il est alors possible d'estimer leur valeur amendante et fertilisante azotée et ainsi de mieux orienter leur usage. Ces résultats de laboratoire peuvent également être utilisés pour calibrer des modèles prédictifs des effets des PRO, comme cela a été fait pour l'outil développé dans PROLEG.

2.2 Un effet fertilisant N des PRO au champ largement expliqué par leur teneur en N minéral

Au-delà des caractérisations de laboratoire et afin de considérer les conditions d'apports, les conditions pédoclimatiques et les spécificités des systèmes de culture du territoire, des essais au champ avec les PRO du territoire ont été réalisés chez des agriculteurs partenaires en collaboration avec la chambre d'agriculture d'Île-de-France. 7 essais pour caractériser la valeur fertilisante azotée à court terme des PRO ont été mis en place suite à une concertation avec les agriculteurs. Les PRO testés comprenaient des PRO usuels du territoire (fumier et lisier bovin, boue urbaine, fumier de cheval...) et des PRO prospectifs (digestats de méthanisation, urine humaine). Différents types d'essais ont été mis en place pour déterminer l'équivalence engrais (à quelle dose d'engrais l'azote du PRO correspond), la dynamique temporelle de minéralisation de l'azote organique de certains PRO ou bien encore l'intérêt de certains PRO en agriculture biologique, selon des protocoles classiques (Réseau PRO, 2015). Un essai de 3 ans a également été mené afin de tester un système autonome en engrais sur plusieurs années combinant effets court et moyen terme des PRO et des LEG.

La détermination des coefficients d'équivalence engrais azotés (KEQ) de nombreux PRO au champ confirme des résultats existants (faible disponibilité de l'azote des fumiers, etc.) et indique des valeurs pour les nouveaux PRO (très forte disponibilité de l'azote des urines, forte pour les digestats). La teneur en azote minéral des PRO apparaît comme le déterminant principal de leur coefficient d'équivalence engrais (Figure 3), mettant en évidence une contribution limitée de la minéralisation de l'azote organique des PRO testés. On remarque cependant que certains PRO ont un KEQ plus élevé qu'attendu d'après leur teneur en azote minéral, soit grâce au potentiel de minéralisation de leur azote organique (boue de STEP, compost de lisier de porc) ou possiblement d'un effet piège à nitrates (fumier de cheval appliqué en fin d'été avec de forts reliquats azotés avant un hiver pluvieux). À l'inverse, certains PRO présentent des KEQ moins élevés qu'attendu (certains apports de lisier ou d'urine), potentiellement en lien avec une volatilisation ammoniacale importante.

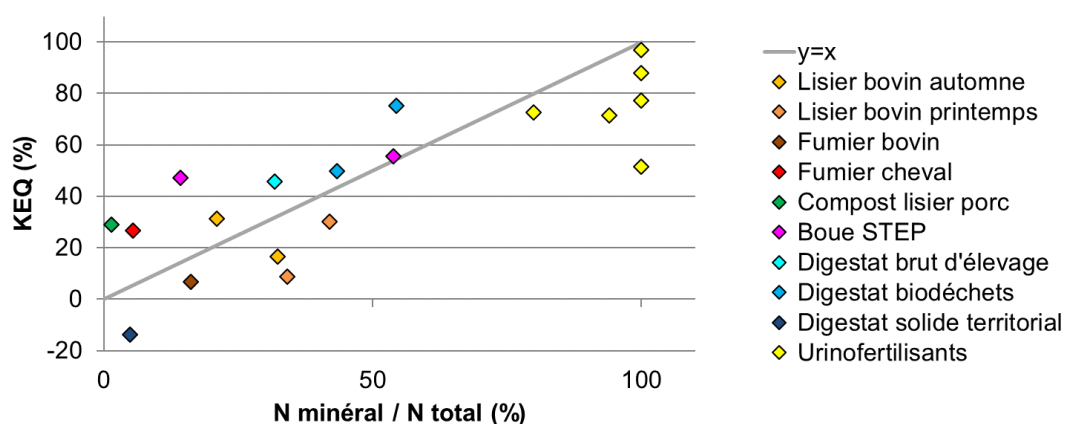


Figure 3: Coefficient d'équivalence engrais (KEQ) en fonction de la proportion d'azote sous forme minérale dans le PRO pour différents PRO testés sur blé ou colza en plaine de Versailles et sur le plateau de Saclay. Adapté de Martin et al. (Soumis)

A côté des essais KEQ, la dynamique de minéralisation du lisier bovin et des fientes, PRO d'intérêt local pour la fertilisation en agriculture biologique, a été étudiée. Entre 20 et 30% de l'azote organique ont été minéralisés 90 jours après apport au champ (résultats non montrés). Ces valeurs sont cohérentes avec le potentiel de minéralisation obtenu au laboratoire, ce qui renforce l'intérêt de cette dernière méthode pour prédire la minéralisation des PRO au champ, comme suggéré par plusieurs auteurs. L'utilisation de ces PRO (ainsi que du digestat ou de l'urine) n'a par contre pas permis d'obtenir des augmentations de rendement significatives en agriculture biologique, soulignant l'importance des autres facteurs limitant en agriculture biologique (adventices...) (résultats non montrés). Concernant les essais avec du compost de déchets verts, aucun phénomène de faim d'azote n'a pu être observé après apport de compost de déchets verts (ni baisse du rendement, de teneur en N du grain, résultats non montrés), malgré les craintes récurrentes des agriculteurs du territoire à ce sujet. Cela confirme l'absence d'effet délétère sur la nutrition azotée pour ce PRO observé dans les incubations de laboratoire (pas d'immobilisation) et renforce l'intérêt à utiliser cet amendement très fréquent sur le territoire. Enfin, l'essai pluriannuel a mis en évidence la faisabilité d'une substitution quasi-totale des engrais azotés, avec des rendements identiques entre référence minérale et traitement avec substitution par du digestat de biodéchets pendant 3 années consécutives (résultats non montrés). Les effets à long terme sur la fertilité du sol d'une telle substitution n'ont pu être observés sur la durée de l'essai et resteraient à étudier (compaction liée aux épandages fréquents, salinisation, contaminants...).

2.3 Connaissance du territoire et place des PRO dans le bouclage des cycles

Les enquêtes d'acteurs du territoire (agriculteurs, techniciens) combinées à une analyse de bases de données existantes ont permis d'identifier les flux de PRO sur le territoire entre origine des déchets, installations de traitements et utilisateurs finaux, les raisons et contraintes à leur usage ainsi que leur contribution aux demandes en nutriments des cultures du territoire (Moinard et al., 2021). Sur la plaine de Versailles, les principaux PRO produits sont en lien avec les activités urbaines et de loisirs : compost de déchets verts amendé ou non avec des farines animales (environ 13 et 9 kt an⁻¹, respectivement), boues d'épuration urbaines (environ 19 kt an⁻¹) et fumier de cheval (environ 8 kt an⁻¹). Malgré le peu d'élevage, le fumier bovin et ovin (4 kt an⁻¹) et le lisier bovin (6 kt an⁻¹) figurent parmi les principaux PRO du fait de la présence d'un élevage de grande taille. L'usage de ces PRO est variable, avec des PRO utilisés principalement localement (composts, fumier et lisier bovin), tandis que d'autres sont majoritairement exportés (boues d'épuration) du fait de contraintes sociétales locales liées à leur épandage. A l'inverse, d'autres PRO sont importés de territoires lointains, comme le compost de lisier de porc et les fientes de volaille. La contribution des PRO actuellement utilisés aux besoins en éléments fertilisants est déjà élevée (de l'ordre de 50% pour P et K), mais reste quasi nulle pour l'azote disponible à court terme (Figure 4). Leur contribution aux entrées de carbone « humifié » dans les sols est également significative, de l'ordre de 20% de celle des résidus de culture. La relocalisation du recyclage de certains PRO permettrait d'augmenter la contribution des PRO, notamment pour le phosphore avec les boues. Le développement de la méthanisation des biodéchets et de la collecte sélective des urines pourrait permettre de combler la totalité des besoins du territoire en fertilisants (y compris en N), indiquant ainsi des potentiels gains en autonomie du territoire.

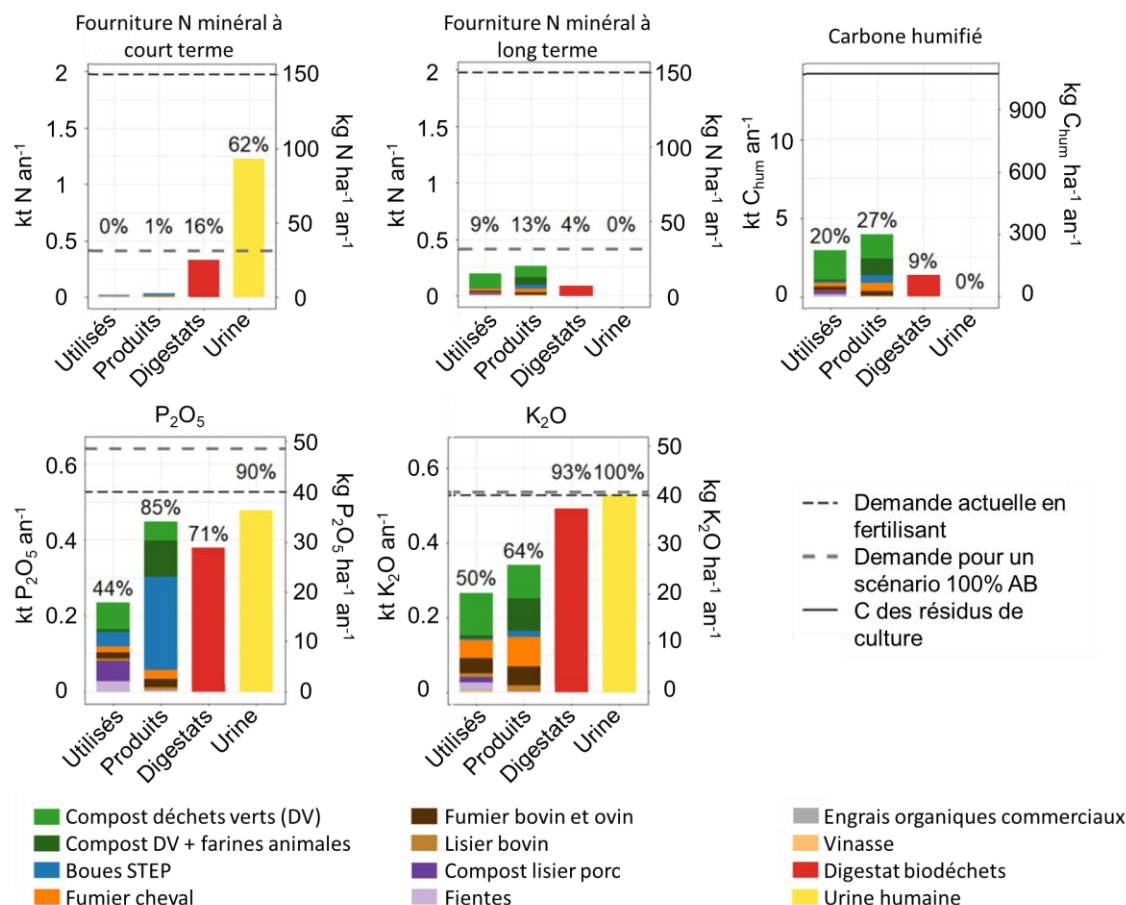


Figure 4: Nutriments disponibles via le recyclage des PRO sur la plaine de Versailles, selon que les PRO soient actuellement utilisés (utilisés = produits – exports + exports) ou produits dans la plaine, ainsi que pour deux scénarios prospectifs : méthanisation des biodéchets actuellement incinérés sur la plaine (digestats) et recyclage des urines humaines actuellement traitées dans les stations d'épuration de la plaine. Les nombres indiquent la part de la demande (N, P, K) comblée par les PRO, ou la proportion équivalente au C humifié restitué par les résidus de culture. Adapté de Moinard et al. (2021).

2.4 Evaluation multicritère

Un large panel de services et disservices associés aux PRO et aux LEG est ressorti des enquêtes (effet sur la matière organique du sol, fourniture azotée, contaminants...). Aucune priorisation franche et partagée ne ressortant, il a donc semblé nécessaire d'intégrer le plus d'indicateurs possibles dans l'évaluation des systèmes. Une recherche des modèles existants pour simuler les effets des PRO et des LEG a été réalisée. Aucun modèle existant n'a été jugé adapté (manque de prise en compte des effets spécifiques des PRO et des LEG, nombre limité d'effets considérés...). Un nouvel outil a alors été développé en combinant des modèles existants.

L'outil PROLEG (Figure 5) combine l'intérêt des outils multicritères d'évaluer avec un ensemble d'indicateurs les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture et la sensibilité de modèles de recherche pour évaluer finement les effets de changement de systèmes. Il intègre ainsi le modèle AMG (Levavasseur et al., 2020) pour évaluer le stockage de carbone et STICS (Brisson et al., 2008 ; Levavasseur et al., 2021) pour évaluer les fournitures d'azote à la plante et les pertes d'azote du système (NO_3^- , N_2O , NH_3). En addition d'indicateurs relatifs au stockage de carbone, aux besoins en engrais ou aux pertes d'azote, l'outil intègre également différentes équations bilan et bases de données qui permettent de calculer des bilans gaz à effet de serre à la parcelle, des bilans de la contamination du sol en métaux ou bien encore des indicateurs de fertilité du sol (battance, biomasse

microbienne, etc.). L'outil n'est pas dédié à la prédiction de la production de biomasse. Il fonctionne avec des objectifs de rendement qui sont prédéfinis, mais il est possible de vérifier si ces objectifs sont atteints ou non. L'outil peut être utilisé selon deux modes de fonctionnement concernant la fertilisation azotée : (1) soit la fertilisation minérale et organique est une donnée d'entrée et l'outil prédit les dynamiques de l'azote suivant ces pratiques, (2) soit l'outil réalise un bilan d'azote prévisionnel prédisant les besoins en azote minéral et s'en sert pour ajuster les doses d'engrais minéral (avec une fertilisation organique qui reste elle une donnée d'entrée).

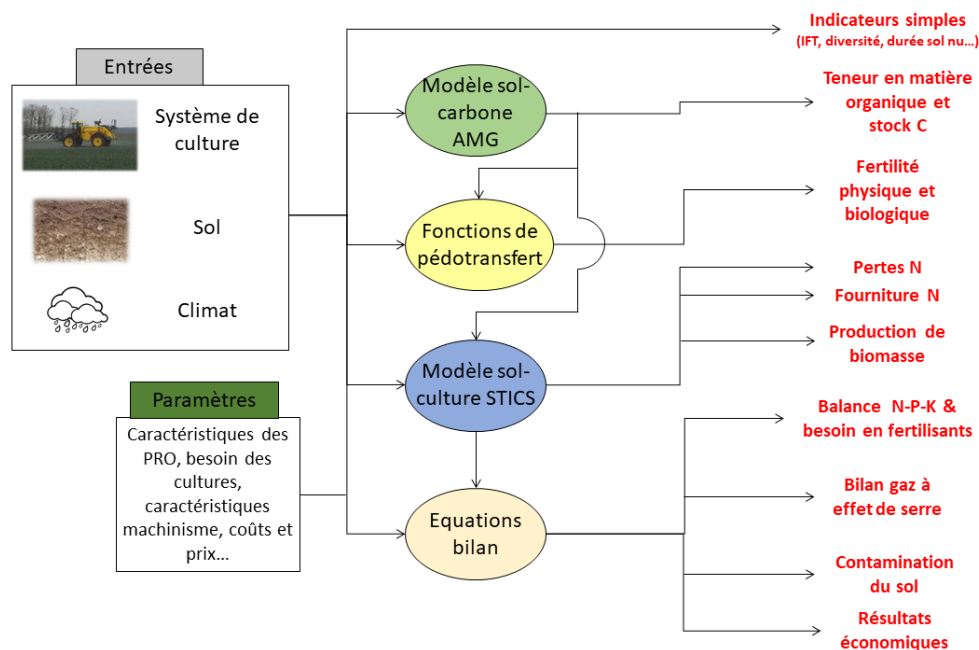


Figure 5: Schéma de principe de l'outil PROLEG. L'outil combine le modèle AMG pour la prédiction du stockage de carbone dans les sols et la teneur en matière organique des sols, le modèle de culture STICS pour les dynamiques de l'azote (fourniture du sol, pertes azotées vers l'eau et l'air), des fonctions de pédotransfert pour décrire l'évolution des propriétés du sol suite aux évolutions de matière organique, des équations bilans permettant de calculer des besoins en engrais, des bilans gaz à effet de serre, des bilans de contaminants, des bilans économiques. L'outil s'appuie sur de nombreuses tables de paramètres (paramètres de modèle, caractéristiques de PRO, références technico-économiques...). L'utilisateur doit fournir en entrée une description du système de culture, des sols et du climat (sous forme de tableur LibreOffice). L'exécution de l'outil se fait via le lancement d'une ligne de code dans R. L'outil fournit alors automatiquement en sortie des représentations graphiques et des tables synthétisant les valeurs des différents indicateurs calculés.

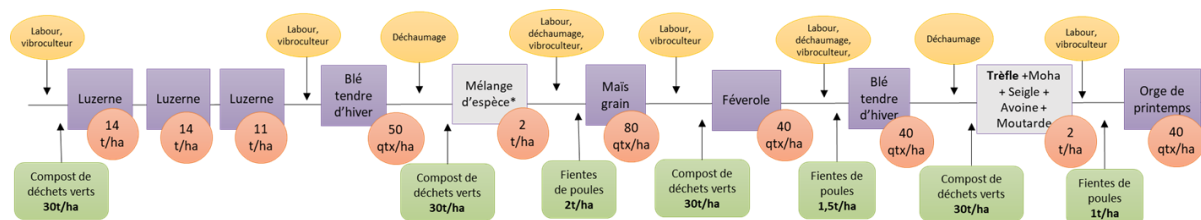
2.5 Co-conception de systèmes de culture

Afin de construire des façons de cultiver répondant à des défis ambitieux en partant des motivations des agriculteurs, des ateliers de co-conception ont été mis en place avec un groupe d'agriculteurs, des chercheurs et des techniciens. La cible de ces ateliers était « avoir des champs fertiles demain avec peu ou sans engrais de synthèse ». Les sorties visées étaient des pistes pour l'insertion des PRO et des légumineuses suivant les services prioritaires attendus par les agriculteurs. La méthode de co-construction de nouveaux systèmes de culture pour répondre à des enjeux territoriaux et des enjeux des exploitations agricoles a déjà été mise en place, par exemple sur une problématique « eau » d'un territoire. Elle a été développée notamment dans le cadre du RMT Système de cultures innovants (Reau et al., 2019).

Chaque atelier était centré sur le cas d'un agriculteur. Les ateliers d'une demi journée se déroulaient de la façon suivante :

- Introduction expliquant le principe et le déroulement des ateliers,
- Présentation par l'agriculteur « central » de la cible de conception prédéfinie avec lui. Les autres participants posaient alors à l'agriculteur toutes les questions de compréhension nécessaire,
- Phase de partage de connaissances : des chercheurs, techniciens ou agriculteurs étaient invités à venir apporter des éléments permettant de mieux comprendre le fonctionnement des champs cultivés,
- Phase d'exploration des idées où chaque participant était invité à faire part de toutes les idées pouvant contribuer à la cible de conception,
- Phase de construction de système de culture à l'aide du plateau de jeux « Mission Ecophyt'Eau » qui permet de matérialiser les systèmes de culture grâce à différentes cartes : cultures, intercultures, pratiques culturales et notamment les apports de PRO avec des cartes supplémentaires créées pour les ateliers PROLEG.
- Modélisation des performances de systèmes de culture précédemment construits avec l'outil PROLEG et aller-retour avec l'agriculteur pour affiner le système le cas échéant.

8 ateliers de co-conception ont été réalisés avec les agriculteurs du territoire. Du fait du début de la crise du Covid à l'issue de ces ateliers, la finalisation des rendus et les allers-retours avec les agriculteurs n'ont pu être menés à leur terme. Ces ateliers ont néanmoins permis des échanges riches entre agriculteurs, techniciens et chercheurs sur la fertilité du sol. Chaque atelier a donné lieu à des comptes rendus des idées émises ainsi qu'à la formalisation de systèmes de culture répondant à la cible de conception. Une partie de ces systèmes a été évaluée avec l'outil pour vérifier s'ils permettaient d'atteindre les objectifs de l'atelier (Figure 6).



Système proposé (1^{ère} rotation : 1-8 ans), puis suppression progressive des apports de fientes sur les rotations suivantes (9-16 ans, 17-24 ans)

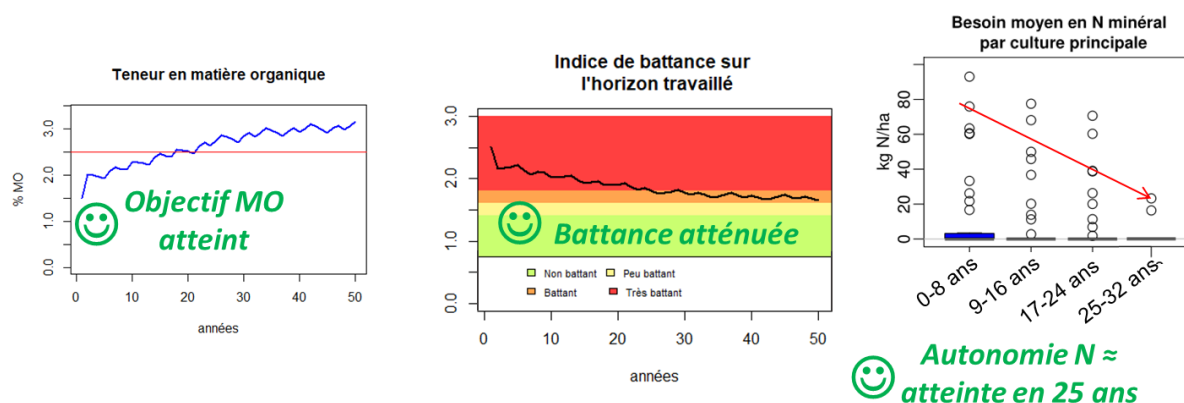


Figure 6: Proposition d'un système de culture en atelier pour répondre à la cible « Dans les terres de limons battants conduites en Agriculture Biologique : en 2025, avoir des cultures très peu carencées en azote, et en 2040, être à 2.5 % de matière organique » (pour limiter la battance notamment) et extrait de l'évaluation des performances avec l'outil PROLEG.

3. Contribution au développement territorial ou aux transitions sur les territoires

Lors de la préparation du projet PROLEG, apparaissait clairement la nécessité de mieux valoriser les ressources organiques produites par le métabolisme urbain dans les territoires péri-urbains, permettant de mettre en place des synergies entre ville et agriculture. Ce projet a permis de définir une démarche de quantification et caractérisation des ressources organiques d'origine urbaine. Les résultats montrent que les ressources organiques actuelles sont déjà abondantes, même en contexte de grandes cultures avec très peu d'élevage. Les ressources organiques disponibles et potentiellement disponibles sur le territoire péri-urbain d'étude représentent un potentiel important de substitution des engrais minéraux. Les évolutions réglementaires devraient permettre prochainement le développement du tri à la source des biodéchets et le recyclage potentiel d'une partie de ceux-ci sous forme de digestat. Les résultats du projet montrent que cela pourrait accroître significativement l'autonomie N des territoires périurbains. Ces résultats confortent l'intérêt de mettre en œuvre ces filières de valorisation des ressources urbaines. Ces résultats ont également déjà profité au territoire, ayant été repris dans une étude sur les gisements disponibles pour la méthanisation (étude GRDF et Plaine de Versailles, Feuerbach et Blecke Homez, 2021).

Les enquêtes faites auprès des agriculteurs montrent qu'ils sont largement conscients de l'intérêt des apports de matières organiques sur leurs sols. Ils sont cependant en attente d'une meilleure connaissance des intérêts agronomiques de ces ressources. Des approches expérimentales au laboratoire et des essais au champ ont apporté des références sur la valeur amendante et fertilisante des ressources organiques disponibles mais aussi sur les nouveaux PRO potentiellement disponibles (digestats, urine). Les PRO du territoire sont donc mieux connus. Ces résultats ont été communiqués à plusieurs reprises aux agriculteurs du territoire.

Le développement de l'outil d'évaluation multicritère en appui aux ateliers de co-conception a permis de travailler avec les agriculteurs du territoire à la conception de systèmes de cultures répondant à leurs attentes : indépendance vis à vis des engrais de synthèse, objectif d'augmenter les teneurs en matière organique des sols.... Cet outil quantifie les effets des systèmes testés sur les stocks de matière organique dans les sols, sur les flux d'azote dans les agrosystèmes, y compris les flux polluants (lixiviation des nitrates, émission GES, volatilisation NH_3), mais aussi les propriétés des sols associées à leur teneur en matière organique (battance, rétention en eau, etc.), les flux de phosphore et potasse, les risques de contamination par les éléments traces associés et enfin une évaluation technico-économique. Au-delà de l'utilisation dans le projet avec les agriculteurs, cet outil peut être utilisé pour évaluer les performances agronomiques et environnementales d'autres systèmes dans d'autres contextes. Il est par exemple remobilisé pour évaluer les systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage en Ile-de-France dans le cadre d'une étude en cours pour la direction régionale de l'agriculture (DRIAAF).

Les impacts économiques ou environnementaux restent pour l'heure potentiels (ou inconnus), mais une augmentation du recyclage des ressources organiques urbaines pourra permettre des économies de traitement (moins d'incinération), d'épuration (moins d'eaux usées), d'engrais (substitution des engrais), mais aussi la production d'énergie (méthanisation). L'augmentation des stocks de matière organique dans les sols avec le retour au sol de ces PRO contribue aussi à l'atténuation du changement climatique. Il faut cependant veiller et confirmer l'innocuité des pratiques. Certains aspects comme la mesure des émissions au cours des traitements préalables n'ont pas été réalisés dans le cadre du projet PROLEG, alors que ces émissions pourraient contrebalancer les effets positifs observés au champ. Il est donc important d'envisager l'ensemble des filières collecte-traitement-transport et épandage dans une appréciation complète des pratiques de gestion organique. Cela n'a pas été entrepris dans le cadre de PROLEG mais c'est une perspective importante, engagée notamment dans le projet ADEME PROTERR.

Enfin, le projet PROLEG a permis le développement des interactions et des collaborations entre INRAE et les acteurs du territoire : associations patrimoniales, chambre d'agriculture, agriculteurs, producteurs de PRO. Ces interactions ont participé à l'émergence de nouveaux projets de recherche (projet Ademe

Agrocapi sur la valorisation des urines par exemple), d'un projet de recherche-action et d'innovation (projet Flux local sur le ré-ancrage des flux alimentaires et de matière organique porté par Terre et Cité) et même à l'émergence d'une séparation à la source des urines dans un des nouveaux bâtiments de Saclay suivi du recyclage des urines chez un agriculteur voisin.

Conclusion

Le projet PROLEG a permis de renforcer les connaissances sur la valorisation agricole des PRO et a démontré les synergies existant entre ville et agriculture, notamment l'intérêt de ces PRO pour la substitution aux engrais minéraux tout en apportant d'autres services. Des ateliers de conception de systèmes de culture, appuyés par l'évaluation multicritère, ont montré qu'il était possible de répondre aux attentes des agriculteurs via ces sources alternatives aux engrais que sont les PRO et les légumineuses. Le projet PROLEG a largement contribué au renforcement des liens entre INRAE, les associations patrimoniales, les agriculteurs et autres acteurs des deux territoires d'étude. Ces liens ont permis la poursuite des travaux dans le cadre d'autres projets, notamment autour des nouvelles ressources que sont les digestats et les urines, ou bien encore sur l'usage des PRO dans les systèmes maraichers.

Remerciements

Les études présentées dans cet article ont reçu le soutien financier accordé par le 4e programme PSDR (INRAE, Région Ile-de-France) dans le cadre du projet « PROLEG ». Certains travaux ont été réalisés en interaction avec les projets AGROCAPI, PROTERR et LEADER Saclay. A ce titre, ils ont reçu un soutien financier de l'ADEME, de SEDE Environnement, du SIAAP, du Labex BASC et du FEADER.

L'ensemble des publications relatives aux 33 projets du programme PSDR4 est consultable : <https://www.psd.fr/>

Références bibliographiques

- Andriulo A., Mary B., Guerif J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomy for Sustainable Development* 19, 365–377. <https://doi.org/10.1051/agro:19990504>
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model, Editions Quae. ed.
- Cambier P., Michaud A., Paradelo R., Germain M., Mercier V., Guérin-Lebourg A., Revallier A., Houot S., 2019. Trace metal availability in soil horizons amended with various urban waste composts during 17 years – Monitoring and modelling. *Science of The Total Environment* 651, 2961–2974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.013>
- Chalhoub M., Garnier P., Coquet Y., Mary B., Lafolie F., Houot S., 2013. Increased nitrogen availability in soil after repeated compost applications: Use of the PASTIS model to separate short and long-term effects. *Soil Biology and Biochemistry* 65, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.023>
- Feuerbach B., Blecke Homez Elom, 2021. Étude de faisabilité pour l'implantation d'une unité de méthanisation sur la Plaine de Versailles. Partie 1 : Estimation des gisements de matières sur la Plaine de Versailles et des territoires alentour.
- Fijalkowski K., Rorat A., Grobelak A., Kacprzak M.J., 2017. The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. *Journal of Environmental Management* 203, 1126–1136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.068>

- Gómez-Muñoz B., Magid J., Jensen L.S., 2017. Nitrogen turnover, crop use efficiency and soil fertility in a long-term field experiment amended with different qualities of urban and agricultural waste. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 240, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.030>
- Gutser R., Ebertseder Th., Weber A., Schraml M., Schmidhalter U., 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 168, 439–446. <https://doi.org/10.1002/jpln.200520510>
- Houot S. et al., 2020. Intensification écologique des systèmes de culture via le recyclage des produits résiduels et les légumineuses pour améliorer les services écosystémiques rendus pour et par les systèmes de culture, Projet PS DR PROLEG, Île-de-France, Série Les 4 pages PS DR4
- Levavasseur F., Lashermes G., Mary B., Morvan T., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Houot S., 2021b. Quantifying and simulating carbon and nitrogen mineralization from diverse exogenous organic matters. *Soil Use and Management* n/a. <https://doi.org/10.1111/sum.12745>
- Levavasseur F., Maillet G., Reau R., Houot S., 2020. Développement d'un outil d'évaluation multicritère pour aider à la conception de systèmes de culture plus autonomes en azote. Séminaire PS DR4. Symposium PS DR 4, 28-30 octobre 2020, en ligne.
- Levavasseur F., Mary B., Christensen B.T., Duparque A., Ferchaud F., Kätterer T., Lagrange H., Montenach D., Resseguier C., Houot S., 2020. The simple AMG model accurately simulates organic carbon storage in soils after repeated application of exogenous organic matter. *Nutr Cycl Agroecosyst.* <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10065-x>
- Levavasseur F., Mary B., Houot S., 2021. C and N dynamics with repeated organic amendments can be simulated with the STICS model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10106-5>
- Martin T.M.P., Levavasseur F., Dion C., Vidal C., Générmont S., Carozzi M., Esculier F., Houot S., Soumis. Nitrogen use efficiency of human urine-based fertilizers is similar to mineral fertilizer but with potentially high volatilization of ammonia. Soumis dans *Agronomy for Sustainable Development*.
- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.B., Savini I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude. INRA.
- Moinard V., Levavasseur F., Houot S., 2021. Current and potential recycling of exogenous organic matter as fertilizers and amendments in a French peri-urban territory. *Resources, Conservation and Recycling* 169, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105523>
- Nakajima T., Lal R., Jiang S., 2015. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. *Soil and Tillage Research* 146, 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.001>
- Obriot F., Stauffer M., Goubard Y., Cheviron N., Peres G., Eden M., Revallier A., Vieublé-Gonod L., Houot S., 2016. Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 232, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.004>
- Parnaudeau V., Nicolardot B., Pagès J., 2004. Relevance of Organic Matter Fractions as Predictors of Wastewater Sludge Mineralization in Soil. *Journal of Environmental Quality* 33, 1885–1894. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.1885>
- Parnaudeau V., Nicolardot B., Robert P., Alavoine G., Pagès J., Duchiron F., 2006. Organic matter characteristics of food processing industry wastewaters affecting their C and N mineralization in soil incubation. *Bioresource Technology* 97, 1284–1295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.023>
- Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., Houot S., 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry* 52, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.023>
- Reau R., Cerf M., Cros C., Ferrane C., Geloën M., Lefevre V., Pasquier C., Petit M.S., Schaub A., 2019. Ateliers de conception de systèmes de culture. Guide pour leur réalisation avec des agriculteurs. RMT SdCI - Ideas.
- Réseau PRO, 2015. Guide méthodologique Réseau PRO. Mise en place d'un essai au champ pour l'évaluation agronomique, environnementale et sanitaire d'un Produit Résiduel Organique.

Schneider A., Huyghe C., (coord.) 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables, 1st ed. Editions QUAE Versailles.

Schneider A., Oddos L., Pelzer E., Jeuffroy M.H., 2018. Comparative analysis of some ecosystem services components linked to nitrogen fluxes of cropping systems with grain legumes. Presented at the 20th N Workshop, Rennes, France.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son DOI)