

Juin 2016  
volume n° 6 / numéro n° 1  
www.agronomie.asso.fr

# Agronomie

## environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

## Regards agronomiques sur les relations entre agriculture et ressources naturelles



Agronomie, Environnement & Sociétés est une revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie (AFA) sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations [www.agronomie.asso.fr/aes](http://www.agronomie.asso.fr/aes). L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

# Avancées et perspectives sur l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les systèmes de culture

*Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems*

Michel-Pierre FAUCON<sup>1,\*</sup>,<sup>§</sup> - Etienne MICHEL<sup>1</sup>  
Hans LAMBERS<sup>2</sup> - David HOUBEN<sup>1,§</sup>

<sup>1</sup> HydrISE (Hydrogéochimie Interactions Sol-Environnement) Unité, UP.2012.10.102, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais (ISAB-IGAL), 19 rue Pierre Waguët, FR-60026 Beauvais, France

<sup>2</sup> School of Plant Biology and Institute of Agriculture, The University of Western Australia, Perth, WA, Australia

\* Auteur correspondant : michel-pierre.faucon@lasalle-beauvais.fr

<sup>§</sup> Contribution équivalente

## Résumé

Le phosphore (P) est un nutriment limitant pour la productivité de nombreux agroécosystèmes. La diminution des réserves mondiales en P minéral constitue une problématique importante pour maintenir la productivité des cultures et assurer la sécurité alimentaire mondiale. Un important challenge est de développer des systèmes d'exploitation et de culture favorisant la disponibilité du P dans les sols, réduisant les apports en P minéral et les pertes en P vers l'environnement. L'objectif de cet article est d'identifier les nouvelles perspectives de recherche en agronomie et les stratégies émergentes pour améliorer la disponibilité du P dans les systèmes de culture et limiter le recours aux sources fossiles de P minéral. Les sujets suivants ont été explorés: i) l'utilisation de ressources renouvelables riches en P (intégrant les résidus de culture, excréments, struvite et biochar), en se concentrant sur les impacts de ces apports sur les propriétés chimiques du sol, la dynamique de la matière organique, les activités rhizosphériques et ultimement la disponibilité du P; ii) les effets des cultures à plusieurs espèces et plus particulièrement les traits fonctionnels des plantes sur la disponibilité du P et la productivité de biomasse, préalablement démontrés dans les écosystèmes herbacés et forestiers. Cette approche originale peut être aussi appliquée aux autres nutriments. L'enjeu pour une gestion durable des ressources en P pour l'agriculture est maintenant de réinventer les systèmes agricoles à différentes échelles et de définir des stratégies de gestion en combinant l'utilisation de ressources renouvelables en P et la gestion des propriétés des sols et des cultures multi-spécifiques.

## Mots-clés

Biochar, disponibilité du phosphore, ingénierie agroécologique, cultures multi-spécifiques, phosphore organique, recyclage du phosphore.

## Abstract

Phosphorus (P) is a limiting nutrient for the productivity of many agroecosystems, and the depletion of global mineral P reserves is

of concern for global food security. Besides, overfertilization with P and its subsequent export through runoff can cause eutrophication of water bodies and natural terrestrial habitats. An important challenge is therefore to develop productive farming systems in which P availability in soils is increased, while reducing mineral P inputs, outputs, and negative off-site impacts. Increasing P availability in cropping systems requires several approaches including management of soil properties and P amendments, agroecology, and plant breeding. The objective of this review is to identify new research perspectives in agronomy to improve the P availability in cropping systems. For this purpose, we explore the following: (1) the use of renewable waste-derived P resources (including crop residues, excreta, struvite, and biochar), with specific focus on the impacts of applications of such renewable P sources on soil chemical properties, soil organic matter dynamics, soil rhizospheric activity, and, ultimately, soil P availability; and (2) the effects of intercropping on P availability, notably the concepts of positive plant-soil feedback, previously demonstrated in grassland and forest ecosystems. The challenge for sustainable management of P resources for agriculture is now to redesign agricultural systems at several scales and to define P management strategies by combining the use of renewable P resources, management of soil properties, intercropping, and crop cultivars.

## Introduction

Le phosphore est un nutriment limitant la productivité de nombreux agrosystèmes et écosystèmes naturels (Suriyagoda *et al.*, 2014). Le phosphore est caractérisé par une faible disponibilité dans le sol en raison de sa faible diffusivité et de sa sorption élevée par certains constituants du sol (Turner *et al.*, 2007). Le phosphore utilisé pour la fertilisation est souvent d'origine chimique et provient de l'extraction minière. Les sources de roches phosphatées de qualité sont finies et leur longévité fait débat (Reijnders, 2014). Etant donné l'importance du phosphore pour maintenir la durabilité de la production agricole et la sécurité alimentaire mondiale, sa gestion durable à différentes échelles, depuis la région jusqu'aux plantes, est indispensable (Senthilkumar *et al.*, 2012b). Le développement de meilleures pratiques de gestion de la fertilisation phosphatée est aujourd'hui à l'étude, non seulement pour des raisons économiques et environnementales (notamment l'eutrophisation des écosystèmes aquatique et terrestre oligotrophique), mais également pour garantir une gestion durable des ressources non renouvelables (Fixen et Johnston, 2012).

L'un des objectifs majeurs est de développer des systèmes de production agricole dans lesquels les apports de fertilisants de synthèse sont limités ou substitués par des intrants phosphatés issus de gisements renouvelables (e.g. déchets provenant des agro-industries ou des collectivités, fumier provenant des élevages, boues d'épurations) (Cordell *et al.*, 2011; Bateman *et al.*, 2011; Senthilkumar *et al.*, 2012a) et dans lesquels la disponibilité du phosphore dans les sols est améliorée. Les différentes stratégies visant à améliorer l'efficacité d'utilisation du phosphore dans les systèmes agricoles ont été étudiées par de nombreux auteurs (par exemple, Lambers *et al.*, 2011, Simpson *et al.*, 2011; Richardson *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2011; Veneklaas *et al.*, 2012). Ces stratégies reposent sur la réduction des pertes vers l'environnement, l'utilisation de fertilisants renouvelables (*i.e.* recyclables à l'échelle de l'exploitation agricole et/ou du territoire considéré), l'amélioration de la disponibilité du

phosphore dans le sol par certains systèmes de culture, et la sélection de plantes capables de maintenir leur productivité en conditions de faible disponibilité en phosphore.

L'objectif de cette revue de littérature extraite de la récente synthèse de Faucon *et al.*, (2015) est d'identifier les nouvelles avancées et perspectives de recherches permettant d'accroître la disponibilité du phosphore dans les systèmes cultivés. Cette synthèse est structurée en deux parties : (1) l'utilisation de ressources renouvelables et les modifications des propriétés du sol pour accroître la disponibilité du phosphore et (2) l'effet des cultures multi-spécifiques sur la disponibilité du phosphore.

## **L'utilisation de ressources renouvelables améliorant la disponibilité du phosphore sans compromettre les ressources minérales finies**

### **Les sources de phosphore**

La transition vers l'utilisation de sources durables de phosphore -en remplaçant les engrais issus de l'exploitation de ressources minérales finies par des coproduits riches en phosphore issus du recyclage des déchets- est de plus en plus suggérée (Dawson et Hilton, 2011). Ces stratégies de recyclage comprennent la récupération du phosphore à partir de déchets liquides ou solides tels que l'urine, les fèces, les eaux grises, le fumier, les carcasses, les déchets d'abattoirs (os, sang, sabots...) et les déchets alimentaires et industriels (Schröder *et al.*, 2010). La plupart de ces sources sont renouvelables et disponibles localement. Cependant elles sont généralement moins concentrées en phosphore et donc plus volumineuses que les fertilisants dérivés de roches phosphatées (Cordell *et al.*, 2009). Leur gestion dans les systèmes d'exploitation en polyculture-élevage est depuis longtemps très avancée grâce à la restitution des effluents d'élevage au champ afin de gérer de manière plus autonome la fertilisation des cultures (Senthilkumar *et al.*, 2012b). Certaines exploitations en élevage présentent même un bilan excédentaire en P suggérant une capacité à fournir des produits riches en P aux exploitations en polyculture seule (Nowak *et al.*, 2015 ; Nesme *et al.*, 2015). Leur valorisation est néanmoins limitée à une échelle régionale dont la taille est influencée par le coût du transport de ces ressources (Nowak *et al.*, 2015).

Cependant, la concentration de la ressource en P par extraction du phosphore présent dans les effluents liquides sous la forme de struvite (phosphate d'ammonium et de magnésium hexa-hydraté,  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) constituerait une solution, suscitant un intérêt croissant (Cordell *et al.*, 2009), pour la commercialisation à plus longue distance et la valorisation des excédents en P des régions densément peuplées et/ou présentant une activité d'élevage hors-sol intense. Il a été suggéré de remplacer les méthodes conventionnelles de déphosphatation physico-chimique des boues de station d'épuration générant des composés phosphatés faiblement solubles, par la production de struvite dont la solubilité est plus élevée (Parsons et Smith, 2008). La struvite est également considérée comme un fertilisant plus respectueux de l'environnement, car la quantité d'azote perdue par volatilisation après son application est plus faible que celle observée pour certains engrais riches en azote comme l'urée (Lind *et al.*, 2000). Cependant plusieurs auteurs ont observé

une co-précipitation de métaux lourds lors de la formation de la struvite (Ronteltap *et al.*, 2007 ; Uysal *et al.*, 2010) ; des études plus récentes démontrent toutefois que les teneurs de ces contaminants dans la struvite restent en-dessous de la limite légale fixée pour les fertilisants (Rahman *et al.*, 2014).

La récupération des éléments nutritifs présents dans l'urine humaine regagne également de l'intérêt. Mihelcic *et al.* (2011) ont estimé que la récupération du phosphore à partir de l'urine de la population mondiale pourrait répondre à 22% de la demande en phosphore mondiale. Selon ces auteurs, cette fraction pourrait même croître avec l'augmentation de la population mondiale et la transition vers un régime alimentaire plus riche en protéines. Entre 95 et 100% du phosphore présent dans l'urine est sous forme inorganique et donc sous une forme disponible pour les plantes, ce qui fait de l'urine (épandue comme telle ou après récupération du phosphore sous forme de struvite) un fertilisant approprié (Jönsson *et al.*, 2004). Le potentiel de développement du recyclage du phosphore, issu des excréta humains, est plus élevé pour les pays en développement car le faible niveau d'équipements sanitaires ne contraint pas l'implantation de systèmes récupérant l'urine. De tels systèmes sont difficiles à installer dans les pays industrialisés car leur mise en œuvre nécessiterait notamment de démanteler les ouvrages existants (Mihelcic *et al.*, 2011).

Plus récemment, il a été suggéré de récupérer le phosphore présent dans les déchets organiques via la production de biochar, résidu solide de la pyrolyse de biomasse (résidus de cultures, boues de station d'épuration, fumiers, déchets de collectivités et déchets alimentaires) sous une atmosphère à faible teneur en oxygène (Lehmann et Joseph, 2009) (Figure 1). Le phosphore se volatilise à des températures (700 – 800 °C) supérieures à celles atteintes lors de la pyrolyse (< 700°C), le biochar contient la totalité du phosphore présent dans les déchets *a contrario* du carbone qui se volatilise à partir de 100°C (Lide, 2004). Par conséquent, la pyrolyse de composés organiques peut augmenter la disponibilité du phosphore en diminuant le ratio C/P et en rompant les liaisons phosphore-carbone organique (Deluca *et al.*, 2009). Le phosphore est ainsi présent sous forme de sel soluble dans les cendres associées aux matériaux carbonisés (Figure 1). Des expériences conduites sur des biochars produits à partir de fumier porcin et d'un mélange de fumier de bovin et de boues de station d'épuration ont par exemple permis d'observer que la quasi-totalité du P de la matière première se retrouvait dans le biochar sous une forme facilement assimilable par les plantes (Azura *et al.*, 2014 ; Wang *et al.*, 2014).

### **La dynamique du phosphore à l'interface sols-déchets**

Le phosphore présent dans le sol sous forme d'ions orthophosphates constitue la source de phosphore la plus accessible pour les plantes. Cependant, sa concentration dans la solution du sol sous cette forme dépasse rarement 10µM (Pierre et Parker, 1927 ; Hossner *et al.*, 1973 ; Yanai, 1991 ; Ron Vaz *et al.*, 1993 ; Johnston *et al.*, 2014 ; Lambers et Plaxton, 2015), ce qui est très faible par rapport aux concentrations intracellulaires en phosphore inorganique (5-20mM) requises pour assurer la croissance de la plante (Fang *et al.*, 2009 ; Vance *et al.*, 2003). L'acquisition du phosphore depuis

un composé organique nécessite préalablement une hydrolyse enzymatique, impliquant des phosphatases secrétées par les microorganismes ou les racines, afin de libérer les ions orthophosphates (Stewart et Tiessen, 1987). Étant donné que les différentes formes organiques du phosphore se minéralisent dans différentes proportions, l'estimation de sa disponibilité dans les amendements organiques est complexe. L'identification de sa spéciation dans de tels amendements devrait dès lors être un prérequis obligatoire avant leur épandage (Shen *et al.*, 2011). Cette connaissance permettrait d'ajuster la dose, la fréquence et la période de l'épandage. Selon Toor *et al.* (2006), la meilleure caractérisation possible du phosphore est issue d'une combinaison de fractionnement chimique et d'analyses spectroscopiques onéreuses. Au vu de l'augmentation du nombre de sources de phosphore recyclable, il est donc essentiel de développer et de valider d'autres méthodes rapides et plus économiques afin d'évaluer le potentiel de libération du phosphore sur le long terme.

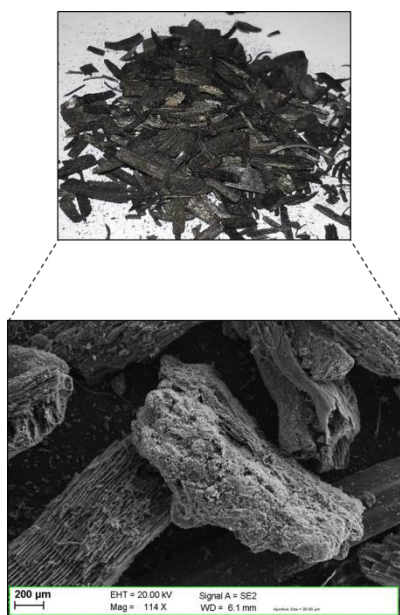


Figure 1 : Particules de biochar (produit à partir de paille de miscanthus), en haut, et photographie prise au microscope électronique à balayage de ces particules, en bas. Sur la photo du bas, on distingue les cendres, potentiellement riches en P, en surface des particules de biochar (crédit photographique : D. Houben).

Les facteurs majeurs qui contrôlent la disponibilité du phosphore dans la solution du sol sont (1) le pH du sol, (2) la concentration d'anions susceptibles d'entrer en compétition avec les anions phosphatés pour les sites d'échange, (3) la teneur en Ca qui peut précipiter les anions phosphatés, (4) la teneur en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium qui peuvent sorber le phosphore (Hinsinger, 2001 ; Ruttenberg, 2014). En modifiant les propriétés chimiques du sol, l'épandage de matière organique peut donc influencer indirectement la disponibilité du phosphore dans les différents pools du sol (Fuentes *et al.*, 2006). Les résultats de récentes études sur le biochar vont également dans ce sens : en sol acide, le biochar augmente la disponibilité du P par voie directe (libération de P par le biochar) et indirecte (modification des propriétés du sol) (Chintala *et al.*, 2014 ; Xu *et al.*, 2013). En revanche, dans des sols neutres et basiques, d'autres études ont montré une diminution de la biodisponibilité du P après l'application de biochar. Ceci pouvant être dû à l'augmentation du pH et à l'apport massif de cations

tels que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  qui favorisent la précipitation du P ou la floculation du P colloïdal (Novak *et al.*, 2009 ; Xu *et al.*, 2014). Les effets indirects jouent donc un rôle majeur sur la régulation du P dans le système sol-biochar.

La disponibilité du phosphore pour les plantes peut également être influencée par l'activité biologique du sol (Richardson et Simpson, 2011). En amendant le sol avec des sources de C directement accessible, l'épandage de déchets organiques stimule la croissance microbienne. Cette croissance peut rapidement diminuer la concentration en P dans la solution du sol suite à la consommation et à l'immobilisation du P par la biomasse microbienne. Cette diminution est cependant temporaire et prend fin lors du turnover de la biomasse microbienne (Malik *et al.*, 2013 ; Bünemann *et al.*, 2004). De même, une accélération de la vitesse de minéralisation de la matière organique du sol peut être observée après l'application d'amendements organiques (phénomène habituellement appelé « *priming effect* » (Kuzyakov et Bol, 2006)). Le P sous forme organique pouvant constituer jusqu'à 80% du P total dans le sol (Anderson, 1980), la stimulation de sa minéralisation par la biomasse microbienne et son hydrolyse par les phosphatases microbiennes et végétales peuvent dès lors accroître la disponibilité du P pour les plantes (Randhawa *et al.*, 2005). En ce qui concerne le biochar, Deluca *et al.* (2009) ont reporté que son application pouvait avoir un effet indirect sur la disponibilité du P en créant un environnement plus favorable aux microorganismes qui, à leur tour, (1) facilitent l'accès au P depuis les fractions organiques et minérales non solubles, (2) produisent et recyclent une importante fraction du P organique labile, et (3) améliorent l'accès direct des plantes au P en favorisant l'activité et le développement des mycorhizes. Cependant, l'impact du biochar sur la biologie du sol et ses conséquences sur la dynamique du P sont loin d'être élucidés (Lehmann *et al.*, 2011) et davantage d'investigations dans ce champ de recherche sont dès lors nécessaires.

Enfin, puisque les amendements organiques affectent la nutrition des plantes, la réponse des plantes à leur application peut aussi affecter la libération du P. Par exemple, la diminution du pH causée par la consommation d'ammonium par les plantes peut augmenter ou diminuer la disponibilité du P dans les sols acides ou alcalins respectivement (Hinsinger, 2001 ; Li *et al.*, 2011). On peut donc supposer que l'apport d'ammonium lors de la dissolution de la struvite favorisera l'acidification rhizosphérique et potentiellement augmentera la disponibilité du P dans les sols alcalins, ou au contraire la diminuera dans les sols acides.

### **Perspectives d'utilisation de sources de phosphore renouvelables**

Les exemples présentés précédemment illustrent la complexité des mécanismes qui contrôlent la disponibilité du P dans le système sol-déchet (figure 2). Bien que les effets des résidus de culture sur la dynamique du P soient de mieux en mieux identifiés, et puissent être modélisés pour estimer leur contribution à l'enrichissement du sol en phosphore disponible (Damon *et al.*, 2014), des recherches complémentaires sont nécessaires pour déterminer et modéliser la contribution des autres déchets organiques tels que fumiers, compost, boues de station d'épuration, excréments (fèces

et urine), struvite et biochar. Dans la perspective d'une utilisation plus efficace du P, le challenge est d'accroître la mobilisation du phosphore organique (Richardson et al., 2011) à partir des déchets et des constituants du sol. En plus d'étudier la libération du phosphore disponible depuis ces amendements, il sera également essentiel d'améliorer la compréhension de leurs effets indirects sur les différentes

fractions du P dans le sol, notamment en prêtant attention aux modifications de la biologie du sol. Enfin, comme souligné par Dawson et Hilton (2011), il apparaît important de mettre à jour la législation pour s'assurer que le P récupéré puisse être utilisé pour un usage agricole.

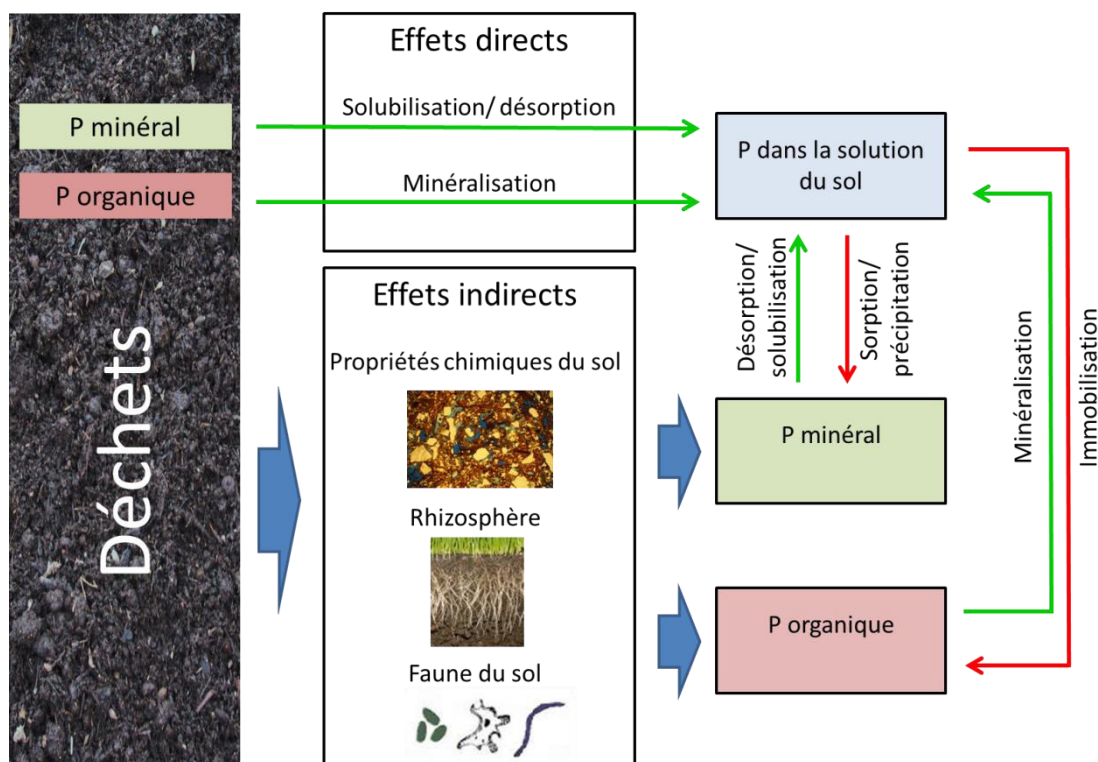


Figure 2 : Dynamique du P dans le système sol-déchet. En plus d'approvisionner la solution du sol en phosphore par solubilisation et désorption des formes minérales ou par minéralisation des formes organiques (effets directs), l'application de déchets peut aussi influencer les propriétés chimiques du sol (par exemple le pH), ainsi que l'activité de la rhizosphère (sécrétions des plantes) et la faune du sol (diversité microbienne) qui influencent la dynamique du phosphore dans le sol (effets indirects) (d'après Faucon et al., 2015).

## Effets des cultures multi-spécifiques sur la disponibilité du phosphore

La gestion de la nutrition en P des cultures passe notamment par une gestion des systèmes de culture favorisant la disponibilité du P dans les sols. Les cultures multi-spécifiques semblent pouvoir représenter à ce titre un des principaux leviers pour améliorer rapidement (*i.e.* au cours de l'année culturale) la disponibilité du phosphore dans les agrosystèmes. Dans la présente partie de l'article, les avancées et perspectives de l'effet des cultures multi-spécifiques sur la dynamique et la disponibilité du P sont ainsi présentées et discutées.

Les cultures multi-spécifiques varient selon leur degré de complexité de deux à *n* espèces. Elles comprennent des cultures associées avec plusieurs cultivars, des cultures compagnes, les systèmes agroforestiers (annuels et pérennes) et les cultures intermédiaires généralement semées entre une culture d'hiver et une culture de printemps (Malézieux et al., 2009). Le mélange spécifique de plantes exerce des effets particulièrement importants sur les organismes présents dans le sol. Ces effets plante-sol sont considérés comme des facteurs clés de régulation des processus de l'écosystème, et de la fourniture de nutriments par le sol (Bardgett et Wardle, 2010). La maîtrise de la relation entre la productivité et la disponibilité du P au sein d'une culture

multi-spécifique nécessite la compréhension des processus écologiques et biogéochimiques présents dans les agrosystèmes (*e.g.*, la facilitation, les effets des végétaux sur les propriétés biologiques du sol et la disponibilité des nutriments et ses conséquences sur la productivité de la culture) afin de dégager des perspectives de gestion de la fertilisation et la nutrition en P des cultures. Toutefois peu d'attention a été portée aux relations entre les traits fonctionnels des végétaux et leur diversité, les cycles des nutriments et la disponibilité du phosphore. D'ailleurs la plupart des études ont été conduites en milieu

forestier ou prairial (par exemple Orwin et al., 2010 ; Cornelissen et Cornwell, 2014). En particulier, il est attendu que les traits fonctionnels liés à la rhizosphère et, indirectement, à la biomasse foliaire, influencent principalement la disponibilité du phosphore dans le sol (Nuruzzaman et al., 2005, 2006).

## La facilitation écologique entre les espèces végétales améliorant la disponibilité du phosphore

L'effet des traits fonctionnels racinaires des plantes sur la disponibilité du P dans des cultures multi-spécifiques a été présenté récemment (Li et al., 2014). Les auteurs ont mis en évidence que les traits fonctionnels impliqués dans la facilitation écologique correspondent à la capacité de certaines

espèces à mobiliser chimiquement certaines formes du P peu accessibles pour d'autres espèces. Ces espèces capables de mobiliser le P améliorent leur nutrition phosphorée ainsi que celle des espèces voisines en sécrétant des phosphatases acides ou des phytases qui vont hydrolyser le P organique et libérer du P inorganique, des protons (dans les sols alcalins pour solubiliser le phosphate lié aux atomes de calcium), et /ou des carboxylates (dans tous types de sols en diminuant le P sorbé sur les oxydes d'aluminium, de fer et les hydroxydes) dans la rhizosphère pour solubiliser les phosphates. Une association de cultures composée d'espèces capables de mobiliser le phosphore ou non correspond à une différenciation de niches spatiales et temporelles dans l'acquisition de ressources pour ces espèces, qui est associée à une augmentation de la productivité en comparaison à une monoculture (Li et al., 2014). La différenciation spatiale de niches écologiques vis-à-vis de la capacité à exploiter le P du sol peut aussi être expliquée par la manière dont les espèces colonisent le profil du sol et le volume total de sol occupé par la culture (Tosti et Thorup-Kristensen, 2010 ; Lynch, 2011).

La facilitation interspécifique impliquée dans l'acquisition du P par les espèces mobilisant le P a été observée dans plusieurs associations de cultures (Li et al., 2014). Selon l'hypothèse du gradient de stress lié à la carence en nutriments, les processus de facilitation ciblés sur le prélèvement du P sont plus efficaces dans un sol pauvre en P et en présence d'une compétition pour les ressources en P (Betencourt et al., 2012). La balance entre la compétition et la facilitation varierait en fonction de l'intensité des contraintes de l'habitat. Par exemple, plusieurs espèces de plantes peuvent accroître leur sécrétion de phosphatase dans le cas de carence ou de compétition pour le P (Tarafdar et Jungk, 1987). L'amélioration des cultures multi-spécifiques vis-à-vis de la disponibilité du P pourrait aussi intégrer les interactions entre les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) et la plante. L'augmentation de la diversité spécifique des plantes supérieures semble avoir un effet positif sur la diversité des communautés de CMA (Bainard et al., 2011) et représenterait un facteur important dans le prélèvement de P par la plante.

### **Effets des relations plante-sol sur la disponibilité du phosphore dans les écosystèmes : quelles perspectives pour la conception des cultures multi-spécifiques ?**

Les cultures multi-spécifiques peuvent avoir des effets indirects sur la disponibilité du P dans les sols. L'influence des traits foliaires, particulièrement la surface spécifique foliaire, la teneur en matière sèche, les ratios C:N et N:P, et la concentration en P de la litière, sur la biodiversité du sol et la décomposition de la litière a récemment été démontrée dans les écosystèmes prairiaux et forestiers (Kazakou et al., 2006 ; Zhou et al., 2008 ; Orwin et al., 2010 ; Harrison et Bardgett, 2010 ; Garnier et Navas, 2012 ; Freschet et al., 2013). Ces caractères fonctionnels foliaires (i.e. des résidus de culture dans les agrosystèmes) peuvent favoriser les communautés bactériennes, fongiques ainsi que la faune du sol, pouvant conduire à un feedback positif sur la croissance des plantes par la décomposition de la litière et un maintien d'une disponibilité élevée du P (Bardgett et Wardle, 2010). Le P inorganique (Pi) et le carbone dans les horizons de

surface de certains écosystèmes tempérés sont fortement corrélés, ce qui suggère que la minéralisation du P organique est couplée avec la décomposition de la matière organique (Gressel et al., 1996). La faune du sol influencée par la diversité fonctionnelle des plantes et la matière organique du sol pourrait accroître la disponibilité du P (voir Faucon et al., 2015). Toutefois seulement quatre des 62 études sur la relation diversité fonctionnelle végétale et faune du sol ont été réalisées dans un agroécosystème ; les autres ont été réalisées dans des écosystèmes non cultivés herbacées et forestiers et très souvent en mésocosme.

La majeure partie de l'évaluation quantitative de l'effet des caractères fonctionnels des plantes sur le fonctionnement des cultures multi-spécifiques s'est focalisée sur le rendement et la productivité primaire aérienne, et relativement peu sur la décomposition de la matière organique du sol. Ces études ne se préoccupent pas de savoir comment les traits fonctionnels pourraient influencer le cycle du P via leurs impacts sur les communautés vivantes et les propriétés chimiques du sol (Eviner et Chapin, 2003). Les cultures multi-spécifiques comme celles développées en semis direct sous couvert végétal (SCV) sont souvent étudiées indépendamment des fonctions de l'agroécosystème (cycles du C, N, P) (figure 3). Par exemple, l'effet du SCV sur la biodiversité du sol est rarement associé à la dynamique et la disponibilité des nutriments dans les agroécosystèmes, et est souvent comparé avec des systèmes de culture conventionnels ou biologiques (Blanchart et al., 2007 ; Pelosi et al., 2009). L'étude des relations entre la diversité fonctionnelle des plantes, les communautés microbiennes, la faune du sol et le fonctionnement de l'écosystème (cycles du C, N et P) implique les hypothèses suivantes (figure 3) : (1) la biomasse et la diversité des traits des résidus de cultures représentent une variabilité d'aliments pour les communautés vivantes du sol influençant positivement la diversité faunistique et microbienne ainsi que la décomposition de la litière et l'immobilisation du P ; (2) La nature chimique des résidus de culture (i.e. trait fonctionnel chimique de la litière) influencerait la disponibilité du P dans les sols. En effet, les résidus de céréales ont des concentrations plus faibles en P et des ratios C:P et C:N plus élevés, donc un potentiel de minéralisation moindre comparé à d'autres traits (ratios C:P et C:N plus faibles) qui favorisent la minéralisation et donc le recyclage du P dans le sol (Damon et al., 2014 ; Maltais-Landry et al., 2014). Quand la concentration en P du sol et la quantité de P inorganique libérée par les résidus de culture sont faibles, le P inorganique présent dans le sol semble être assimilé par la biomasse microbienne et donc engendre une diminution du P disponible pour les plantes (Damon et al., 2014). La décomposition d'un mélange de résidus de cultures montre des effets synergétiques (par exemple une décomposition plus rapide que la moyenne de décomposition des conditions monospécifiques), des effets négatifs (par exemple une décomposition plus lente que prévue) ou des effets additionnels (par exemple un taux équivalent à ceux attendus) (Redin et al., 2014). Les effets non additifs observés dans des mélanges de types de résidus seraient dus au transfert de P entre les litières riches et pauvres en P, comme démontré dans des études sur le cycle du N (Berglund et al., 2013). L'hétérogénéité des résidus de culture induirait une cinétique de décomposition qui serait syn-

chrones aux besoins nutritionnels de la culture. Le challenge est maintenant d'étudier simultanément les interactions entre les traits fonctionnels des plantes (foliaires et racinaires), les microorganismes et la faune du sol dans différents contextes pédoclimatiques et différentes rotations afin de comprendre les processus biogéochimiques et écologiques impliqués dans le recyclage du P et sa disponibilité, et de pouvoir développer des cultures multi-spécifiques.

La large variabilité d'influence des résidus de culture sur la disponibilité du P pour la culture suivante soulève la nécessité d'intégrer la dynamique du P aux interfaces plante-litière-sol dans les modèles agronomiques et biogéochimiques

T1

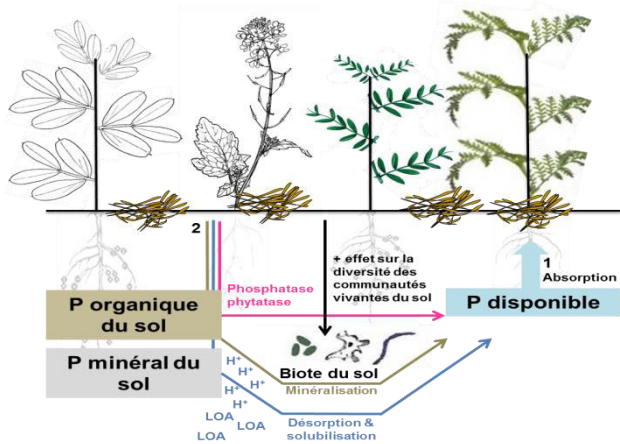


Figure 3 : Effet positif des relations plante-sol d'un couvert végétal sur la disponibilité du P pour la culture suivante. Le couvert est composé de lentilles (*Lens culinaris*), fèves (*Vicia faba*), moutardes blanches (*Sinapsis alba*), et phacélie à feuilles de tanaisie (*Phacelia tanacetifolia*) implantées dans un système en semis direct. T1 (étape 1) : Relations entre la diversité fonctionnelle d'un couvert composé d'espèces mobilisant le P présentant des traits morphologiques contrastés (racines, tiges, feuilles) et la disponibilité du P. T2 (étape 2) : Les traits morphologiques et chimiques des résidus de culture influenceront la disponibilité du P. T3 (étape 3) : L'hétérogénéité du mélange de résidus de culture se décomposant à la surface du sol présenterait une cinétique de décomposition synchronisée vis-à-vis des besoins en P de la culture. LOA= acide organique à faible masse molaire (malate et oxalate) (d'après Faucon et al., 2015).

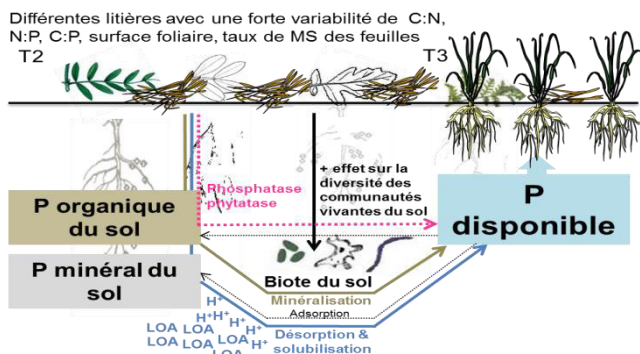
## Conclusion

De nombreuses pratiques culturales existent pour favoriser le recyclage du P aux différentes échelles (système de culture, exploitation agricole et territoire) et sa disponibilité dans les sols. Le futur challenge dans la gestion de systèmes de culture favorisant le recyclage et/ou la disponibilité du P sera de combiner l'utilisation des ressources en P renouvelable, la gestion des propriétés des sols, le développement de cultures (notamment les cultures multi-spécifiques) et de variétés répondant à la fois aux exigences des filières agroindustrielles et l'amélioration de la disponibilité du P dans les sols.

## Remerciements

Institut Polytechnique LaSalle Beauvais (IPLB, Fr), le pôle de compétitivité Industries-Agro-Ressources (IAR, Fr) et la Région Picardie-Nord-Pas-de-Calais sont remerciés pour leur soutien pour le développement du projet structurant de recherche en agriculture de l'IPLB (ECOPHOR 2020) qui s'intitule « Gestion durable de la fertilité des sols et de la fertilisation des cultures, vers une nouvelle gestion des nutriments, des territoires aux champs ». Anne-Maïmiti Mercadal-Dulaurent est remerciée pour la mise à disposition de la bibliographie sur l'effet des communautés de la faune du sol sur la disponibilité du phosphore.

estimant les flux et bilans des nutriments dans un système de culture. Les modèles estimant la disponibilité du P et la dynamique du cycle du P dans les systèmes de culture pourraient être développés en se basant sur l'effet des traits fonctionnels des plantes (Faucon et al., 2015). Ils incluront aussi l'effet de la variabilité des traits inter- et intraspécifiques, des données climatiques et des propriétés du sol initiales. Cette approche centrée sur les traits (sans s'intéresser à la taxonomie des espèces et des variétés) pour modéliser la disponibilité du P (et d'autres nutriments) constituerait un levier technologique pour la gestion durable de la fertilité des sols et de la fertilisation phosphatée des cultures.



## Références

- Anderson, G., 1980. Assessing organic phosphorus in soil. In: Khasawneh, F.E., Sample, E.C., Kamprath, E.J. (Eds.), *The Role of Phosphorus in Agriculture*, Madison, American Society of Agronomy, pp. 411-431.
- Azuara, M., S.R.A. Kersten, A.M.J. Koostera, 2014. Recycling phosphorus by fast pyrolysis of pig manure: concentration and extraction of phosphorus combined with formation of value-added pyrolysis products. *Biomass Bioenergy*, 49, 171-180.
- Bainard, L.D., J.N. Klironomos, A.M. Gordon, 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi in treebased intercropping systems: a review of their abundance and diversity. *Pedobiologia*, 54, 57-61.
- Bardgett, R.D., D.A. Wardle, 2010. Aboveground-belowground Linkages: Biotic Interactions, Ecosystem Processes, and Global Change. *Oxford University Press*, Oxford.
- Bateman, A., H. van derHorst, D. Boardman, A. Kansal, C. Carliel-Marquet, 2011. Closing the phosphorus loop in England: the spatio-temporal balance of phosphorus capture from manure versus crop demand for fertiliser. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 1146-1153.
- Berglund, S.L., G.I. Agren, A. Ekblad, 2013. Carbon and nitrogen transfer in leaf litter mixtures. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 341-348.

- Betencourt, E., M. Duputel, B. Colomb, D. Desclaux, P. Hinsinger, 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 181-190.
- Blanchart, E., M. Bernoux, X. Sarda, M. Siqueira Neto, C.C. Cerri, M. Piccolo, J.M. Douzet, E. Scopel, C. Feller, 2007. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in central Brazil. *Agriculturae Conspexus Scientificus*, 72, 81-87.
- Bünemann, E.K., D.A. Bossio, P.C. Smithson, E. Frossard, A. Oberson, 2004. Microbial community composition and substrate use in a highly weathered soil as affected by crop rotation and P fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*. 36, 889-901.
- Chintala, R., T.E. Schumacher, L.M. McDonald, D.E. Clay, D.D. Malo, S.K. Papiernik, S.A. Clay, J.L. Julson, 2014. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *CLEAN*, 42, 626-634.
- Cordell, D., A. Rosemarin, J.J. Schröder, A.L. Smit, 2011. Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere*, 84, 747-758.
- Cordell, D., J.O. Drangert, S. White, 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 292-305.
- Cornelissen, J.H., W.K. Cornwell, 2014. The Tree of Life in ecosystems: evolution of plant effects on carbon and nutrient cycling. *Journal of Ecology*, 102, 269-274.
- Damon, P.M., B. Bowden, T. Rose, Z. Rengel, 2014. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: a review *Soil Biology and Biochemistry*, 74, 127-137.
- Dawson, C.J., J. Hilton, 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, 36, S14-S22.
- DeLuca, T.H., M.D. MacKenzie, M.J. Gundale, 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for environmental management-science and technology*. London, Earthscan, pp. 251-270.
- Driver, J., D. Lijmbach, I. Steen, 1999. Why recover phosphorus for recycling, and how? *Environmental Technology*, 20, 651-662.
- Eviner, V.T., F.S. Chapin III, 2003. Functional matrix: a conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 455-485.
- Fang, Z., C. Shao, Y. Meng, P. Wu, M. Chen, 2009. Phosphate signaling in Arabidopsis and Oryza sativa. *Plant Science*, 176, 170-180.
- Faucon, M.-P., D. Houben, J.-P. Reynoird, A.-M. Dulaurent-Mercadal, R. Armand, H. Lambers, 2015. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Advances in Agronomy* 134, 51-79.
- Fixen, P.E., A.M. Johnston, 2012. World fertilizer nutrient reserves: a view to the future *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92,1001-1005.
- Freschet, G.T., W.K. Cornwell, D.A. Wardle, T.G. Elumeeva, W. Liu, B.G. Jackson, V.G. Onipchenko, N.A. Soudzilovskaia, J. Tao, J.H. Cornelissen, 2013. Linking litter decomposition of above-and below-ground organs to plant soil feedbacks worldwide. *Journal of Ecology*, 101, 943-952.
- Fuentes, B., N. Bolan, R. Naidu, M. de la Luz Mora, 2006. Phosphorus in organic wastesoil systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 6, 64-83.
- Garnier, E., M.-L. Navas, 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology, *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 365-399.
- Gressel, N., J.G. McColl, C.M. Preston, R.H. Newman, R.F. Powers, 1996. Linkages between phosphorus transformations and carbon decomposition in a forest soil. *Biogeochemistry*, 33, 97-123.
- Harrison, K.A., R.D. Bardgett, 2010. Influence of plant species and soil conditions on plant-soil feedback in mixed grassland communities. *Journal of ecology*, 98, 384-395.
- Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 237, 173-195.
- Hossner, L.R., J.A. Freeouf, B.L. Folsom, 1973. Solution phosphorus concentration and growth of rice (*Oryza sativa* L.) in flooded soils, *Soil Science Society of America, J.* 37, 405-408.
- Inguanzo, M., A. Dominguez, Menéndez, J.A., 2002. On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 63, 209-222.
- Johnston, A.E., P.R. Poulton, P.E. Fixen, D.Curtin, 2014. Phosphorus: its efficient use in agriculture. *Advances in Agronomy*, 123, 177-228.
- Jönsson, H., A.R. Stintzing, B.Vinneras, E. Salomon, 2004. Guidelines on the Use of Urine and Faeces in Crop Production. *EcoSanRes*, Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Kazakou, E., D. Vile, B. Shipley, C. Gallet, E. Garnier, 2006. Covariations in litter decomposition, leaf traits and plant growth in species from a Mediterranean old-field succession. *Functional Ecology*, 20, 21-30.
- Kuzyakov, Y., R. Bol, 2006. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 747-758.
- Lambers, H., P.M.Finnegan, E.Laliberté, S.J. Pearse, M.H. Ryan, M.W. Shane, E.J. Veneklaas, 2011. Phosphorus nutrition of Proteaceae in severely phosphorus impoverished soils: are there lessons to be learned for future crops? *Plant Physiology*, 156,1058-1066.
- Lambers, H., W.C. Plaxton, 2015. Phosphorus: back to the roots. In: Plaxton, W.C., H. (Eds.)Lambers, *Phosphorus Me-*



- tabolism in Plants in the Post-genomic Era: From Gene to Ecosystem, 48. Wiley-Blackwell Publishing, Chichester, p. 3.
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday, D. Crowley, 2011. Biochar effects on soil biota a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1812-1836.
- Lehmann, J., S. Joseph, 2009. Biochar for environmental management - an introduction. In: Lehmann, J., S. (Eds.) Joseph, *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 1-12.
- Li, L., D. Tilman, H. Lambers, F.S. Zhang, 2014. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytology*, 203, 63-69.
- Li, S.-X., Z.-H. Wang, B.A. Stewart, 2011. Chapter Three - Differences of some leguminous and nonleguminous crops in utilization of soil phosphorus and responses to phosphate fertilizers. *Advances in Agronomy*, 110, 125-249.
- Lide, D.R., 2004. Handbook of Chemistry and Physics. CRC, Boca Raton, Florida.
- Lind, B.B., Z. Band, S. Bydén, 2000. Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite. *Bioresource Technology*, 73, 169-174.
- Liu, L., P. Gundersen, T. Zhang, J. Mo, 2012. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China. *Soil Biology and Biochemistry*, 44, 31-38.
- Lynch, J.P., 2011. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. *Plant Physiology*, 156, 1041-1049.
- Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. de Tourdonnet, M. Valantin-Morison, 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models: a review. In: *Sustainable Agriculture*. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 329-353.
- Malik, M.A., K.S. Khan, P. Marschner, F. ul-Hassan, 2013. Microbial biomass, nutrient availability and nutrient uptake by wheat in two soils with organic amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 955-966.
- Maltais-Landry, G., K. Scow, E. Brennan, 2014. Soil phosphorus mobilization in the rhizosphere of cover crops has little effect on phosphorus cycling in California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 255-262.
- Mihelcic, J.R., L.M. Fry, R. Shaw, 2011. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. *Chemosphere*, 84, 832-839.
- Nesme, T., K. Senthilkumar, A. Mollier, S. Pellerin, 2015. Effects of crop and livestock segregation on phosphorus resource use: A systematic, regional analysis. *European Journal of Agronomy*, 71, 88-95.
- Novak, J.M., W.J. Busscher, D.L. Laird, M. Ahmedna, D.W. Watts, M.A.S. Niandour, 2009. Impact of biochar amendment on soil fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174, 105-112.
- Nowak, B., T. Nesme, C. David, S. Pellerin, 2015. Nutrient recycling in organic farming is related to diversity in farm types at the local level. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 204, 17-26.
- Nuruzzaman, M., H. Lambers, M.D.A. Bolland, E.J. Veneklaas, 2005. Phosphorus uptake by grain legumes and subsequently grown wheat at different levels of residual phosphorus fertiliser. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 1041-1047.
- Nuruzzaman, M., H. Lambers, M.D.A. Bolland, E.J. Veneklaas, 2006. Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes. *Plant and Soil*, 281, 109-120.
- Orwin, K.H., S.M. Buckland, D. Johnson, B.L. Turner, S. Smart, S. Oakley, R.D. Bardgett, 2010. Linkages of plant traits to soil properties and the functioning of temperate grassland. *Journal of Ecology*, 98, 1074-1083.
- Parsons, S.A., J.A. Smith, 2008. Phosphorus removal and recovery from municipal wastewaters. *Elements*, 4, 109-112.
- Pascual, J.A., J.L. Moreno, T. Hernandez, C. Garcia, 2002. Persistence of immobilised and total urease and phosphatase activities in a soil amended with organic wastes. *Scientia horticulturae*, 82, 73-78.
- Pelosi, C., M. Bertrand, J. Roger-Estrade, 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 287-295.
- Pierre, W.H., F.W. Parker, 1927. Soil phosphorus studies: II. The concentration of organic and inorganic phosphorus in the soil solution and soil extracts and the availability of the organic phosphorus to plants. *Soil Science*, 24, 119-128.
- Rahman, M.M., M.A.M. Salleh, U. Rashid, A. Ahsan, M.M. Hossain, C.S. Ra, 2014. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization - a review. *Arabian Journal of Chemistry*, 7, 139-155.
- Randhawa, P.S., L.M. Condron, H.J. Di, S. Sinaj, R.D. McLennaghan, 2005. Effect of green manure addition on soil organic phosphorus mineralisation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73, 181-189.
- Redin, M., S. Recous, C. Aita, G. Dietrich, A.C. Skolaude, W.H. Ludke, R. Schmatz, S.J. Giacomini, 2014. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 65-75.
- Reijnders, L., 2014. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resources Conservation Recycling*, 93, 32-49.
- Richardson, A.E., J.P. Lynch, P.R. Ryan, E. Delhaize, F.A. Smith, S.E. Smith, P.R. Harvey, M.H. Ryan, E.J. Veneklaas, H. Lambers, A. Oberson, R.A. Culvenor, R.J. Simpson, 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 349, 121-156.

- Richardson, A.E., R.J. Simpson, 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. *Plant Physiology*, 156, 989-996.
- Ron Vaz, M.D., A.C. Edwards, C.A. Shand, M.S. Cresser, 1993. Phosphorus fractions in soil solution: influence of soil acidity and fertiliser additions. *Plant and Soil*, 148, 175-183.
- Ronteltap, M., M. Maurer, W. Gujer, 2007. The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water Research*, 41, 1859-1868.
- Ruttenberg, K.C., 2014. The global phosphorus cycle. In: Holland, H.D., K.K. (Eds.) Turekian, *Treatise on Geochemistry*, Second ed. Elsevier, Oxford, pp. 499-558.
- Schröder, J.J., D. Cordell, A.L. Smit, A. Rosemarin, 2010. Sustainable Use of Phosphorous. Report No. 357. *Plant Research International*, Wageningen, NL.
- Senthilkumar, K., T. Nesme, A. Mollier, S. Pellerin, 2012a. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: the importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92, 145-159.
- Senthilkumar, K., T. Nesme, A. Mollier, S. Pellerin, 2012b. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: the case of France. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB2008.
- Shen, J., L. Yuan, J. Zhang, H. Li, Z. Bai, X. Chen, W. Zhang, F. Zhang, 2011. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology*, 156, 997-1005.
- Simpson, R.J., A. Oberson, R.A. Culvenor, M.H. Ryan, E.J. Veneklaas, H. Lambers, A. Oberson, R.A. Culvenor, A.E. Richardson, 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant and Soil*, 349, 89-120.
- Stewart, J.W., H. Tiessen, 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, 4, 41-60.
- Suriyagoda, L.D.B., M.H. Ryan, M. Renton, H. Lambers, 2014. Plant responses to limited moisture and phosphorus availability: a meta-analysis. *Advances in Agronomy*, 124, 143-200.
- Tarafdar, J., Jungk, A., 1987. Phosphatase-activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biol. Fertil. Soils* 3, 199-204.
- Toor, G.S., S. Hunger, J.D. Peak, J.T. Sims, D.L. Sparks, 2006. Advances in the characterization of phosphorus in organic wastes: environmental and agronomic applications. *Advances in Agronomy*, 89, 1-72.
- Tosti, G., K. Thorup-Kristensen, 2010. Using coloured roots to study root interaction and competition in intercropped legumes and non-legumes. *Journal of Plant Ecology*, 3, 191-199.
- Turner, B.L., A.E. Richardson, E.J. Mullaney, 2007. Inositol Phosphates: Linking Agriculture and the Environment. *CAB International*, Wallingford, UK.
- Uysal, A., Y.D. Yilmazel, G.N. Demirer, 2010. The determination of fertilizer quality of the formed struvite from effluent of a sewage sludge anaerobic digester. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 248-254.
- Vance, C.P., C. Uhde-Stone, D.L. Allan, 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytology*, 157, 423-447.
- Veneklaas, E.J., H. Lambers, J. Bragg, P.M. Finnegan, C.E. Lovelock, W.C. Plaxton, C.A. Price, W.R. Scheible, M.W. Shane, P.J. White, J.A. Raven, 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytology*, 195, 306-320.
- Wang, T., M. Camps-Arbestain, M. Hedley, 2014. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system. *Plant and Soil*, 375, 61-74.
- Xu, G., J.N. Sun, H.B. Shao, S.X. Chang, 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological engineering*, 62, 54-60.
- Xu, G., L.L. Wei, J.N. Sun, H.B. Shao, S.X. Chang, 2013. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism? *Ecological engineering*, 52, 119-124.
- Yanai, R.D., 1991. Soil solution phosphorus dynamics in a whole-tree-harvested northern hardwood forest. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1746-1752.
- Zhou, G., L. Guan, X. Wei, X. Tang, S. Liu, J. Liu, D. Zhang, J. Yan, 2008. Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China. *Plant and Soil*, 311, 61-72.