



**HAL**  
open science

## Quels leviers pour une gestion plus durable des cycles biogéochimiques dans le cadre de la transition agroécologique ?

S. Pellerin, José Martinez

### ► To cite this version:

S. Pellerin, José Martinez. Quels leviers pour une gestion plus durable des cycles biogéochimiques dans le cadre de la transition agroécologique?. *Innovations Agronomiques*, 2015, 43, pp.107-113. hal-01146649

**HAL Id: hal-01146649**

**<https://hal.science/hal-01146649v1>**

Submitted on 18 May 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Quels leviers pour une gestion plus durable des cycles biogéochimiques dans le cadre de la transition agroécologique ?

Pellerin S.<sup>1</sup>, Martinez J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INRA, UMR 1391 ISPA Interactions Sol-Plante-Atmosphère, F-33883 Villenave d'Ornon Cedex

<sup>2</sup> IRSTEA, Centre de Rennes, F-35044 - Rennes Cedex

Correspondance : pellerin@bordeaux.inra.fr ; jose.martinez@irstea.fr

### Résumé

Ce texte constitue l'introduction à l'atelier « Boucler les grands cycles biogéochimiques » du colloque agroécologie du 18 Octobre 2013. Il est inspiré des réalisations des Chambres d'agricultures, des instituts techniques, des journées d'échange entre les départements Environnement et Agronomie (EA), Physiologie Animale et Système d'Élevage (PHASE) et Sciences pour l'Action (SAD), des travaux sur les procédés de l'Irstea. Il énonce les enjeux et pose les bases conceptuelles relatives à la réduction des émissions d'azote et de phosphore dans l'environnement, au stockage du carbone dans les sols. Il montre que les leviers mobilisables pour engager la transition agroécologique se situent à différents niveaux d'organisation emboîtés.

**Mots-clés:** Cycles biogéochimiques, azote, phosphore, carbone, produits organiques, recyclage

### Abstract: Levers for a more sustainable management of biogeochemical cycles in the context of the agroecological transition

This text is the introduction to the workshop "Closing major biogeochemical cycles" of the symposium on Agroecology, on October 18<sup>th</sup>. It is based on concrete achievements of Agricultural Chambers and technical institutes, the discussions between Inra scientific divisions (Agronomy and Environment, EA, Animal physiology and breeding systems, PHASE, sciences for Actions, SAD), and on recent findings from Irstea on recovery processes. The issues are exposed and conceptual bases on how to reduce nitrogen and phosphorus emissions and increase carbon storage are proposed. It is concluded that levers towards the agroecological transition can be found at several embedded organization levels.

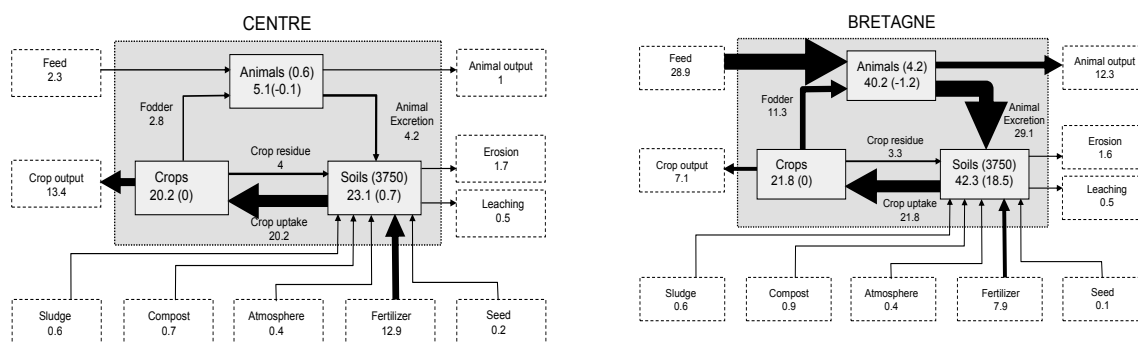
**Keywords:** Biogeochemical cycles, nitrogen, phosphorus, organic products, recycling.

## 1. De la fertilisation raisonnée à la gestion durable des cycles biogéochimiques

L'intensification de l'agriculture, la spécialisation des systèmes et des régions de production, la ségrégation géographique entre zones de production et zones de consommation ont fortement modifié les cycles biogéochimiques des principaux éléments minéraux utilisés en agriculture. Au cours des 45 dernières années, la multiplication par 2,5 de la production alimentaire mondiale s'est accompagnée d'une multiplication par 8 et 3,5 des quantités d'engrais minéraux azotés et phosphatés apportés, respectivement. Cette augmentation s'est accompagnée d'impacts négatifs sur l'environnement, voire de risques pour la santé humaine, tels que la réduction de la potabilité de l'eau du fait de sa contamination par les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques continentaux et marins dus aux apports de N et P, l'altération de la qualité de l'air due à la volatilisation d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et d'autres composés azotés ( $\text{NO}_x$ ) et polluants dérivés (ozone, particules), l'émission de gaz à effet de serre contribuant au changement climatique ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et la réduction de la biodiversité liée aux transferts d'azote vers l'ensemble des écosystèmes. Parallèlement, la diminution de la surface en

prairie permanente et la réduction des apports au sol de matières organiques dans les régions où l'élevage a disparu ont contribué à une réduction du stock de carbone organique des sols. L'augmentation prévue de la population mondiale place l'agriculture face à un double défi : augmenter la production, pour satisfaire la demande alimentaire croissante et les besoins non alimentaires émergents (biocarburants), tout en contribuant à la préservation de l'environnement et en gérant durablement les ressources indispensables dont dispose la planète pour la production agricole. La gestion des cycles des éléments minéraux, en lien avec celui du carbone, se situe au cœur de cette problématique car ils sont à la fois indispensables à la croissance des végétaux et des animaux et des polluants potentiels de l'environnement. La fabrication des engrais minéraux azotés et phosphatés fait appel à des ressources non renouvelables, en cours de raréfaction (gaz naturel et énergie pour la synthèse chimique d'azote minéral, roches phosphatées pour la fabrication d'engrais P). Réciproquement, l'agriculture peut contribuer à la régulation du cycle du carbone, et donc à l'atténuation du changement climatique, via le stockage de C dans les sols et dans la biomasse ou via la production d'énergie renouvelable (méthanisation par exemple).

Le raisonnement de la fertilisation minérale et la gestion de la teneur en carbone organique des sols sont un des domaines de l'agronomie où le système de recherche-développement a produit et agrégé des connaissances qui ont permis l'élaboration d'outils de diagnostic et d'aide à la décision utilisés à grande échelle. Le concept de "Fertilisation raisonnée", développé dans les années 70, visait une optimisation de la fertilisation à l'échelle parcellaire annuelle (la bonne dose, au bon moment et au bon endroit), avec comme objectif de satisfaire les besoins de la culture tout en minimisant les fuites vers l'environnement. Les apports d'engrais minéraux phosphatés sur les sols agricoles français ont été divisés par 3 entre les années 1970 et 2010 (UNIFA, 2012), ce qui est probablement lié en partie au contexte économique incitant aux économies d'intrants, mais aussi aux outils de raisonnement de la fertilisation phosphatée déployés pendant cette période qui ont accompagné une réduction raisonnée des apports. L'usage des engrais minéraux azotés est également en baisse depuis la fin des années 80, mais de façon beaucoup moins marquée, et le bilan azoté des sols agricoles français demeure en moyenne largement excédentaire. Il subsiste des hétérogénéités inter-régionales fortes, avec des régions largement excédentaires en N et/ou P, notamment pour des raisons structurelles (Figure 1).



**Figure 1:** Stocks et flux de P à l'échelle régionale: exemple des régions Centre (région de grande culture) et Bretagne (région d'élevage intensif). En région Bretagne, le bilan P des sols est largement excédentaire, du fait surtout des entrées via les aliments animaux importés. En région Centre, le bilan P des sols est proche de l'équilibre, mais ceci grâce à des entrées via des engrais minéraux P importés. La spécialisation régionale entre productions animales et végétales est un frein à ce que les ressources en effluents d'élevage d'une région soient utilisées en substitution des engrais minéraux importés dans l'autre (Senthilkumar et al., 2012).

Le raisonnement de la fertilisation à l'échelle parcellaire reste plus que jamais d'actualité, car des marges de progrès importantes subsistent à cette échelle, mais la montée en puissance des enjeux environnementaux (qualité de l'air et de l'eau, changement climatique,...) avec lesquels les pratiques de fertilisation interfèrent, les progrès des connaissances (e.g. cascade de l'azote) et les objectifs de la

transition agro-écologique militent pour la mobilisation d'un spectre beaucoup plus large de leviers, d'ores et déjà disponibles ou à consolider, et se situant à différents niveaux d'organisation et échelles spatiales incluant des échelles larges.

## 2. Quels leviers pour gérer plus durablement des cycles biogéochimiques dans le cadre de la transition agro-écologique?

Le concept de cascade de l'azote (Galloway, 2008) a illustré dans le cas de cet élément que toute molécule d'azote réactif fabriquée industriellement et utilisée en agriculture, même dans le cadre d'une fertilisation raisonnée, était susceptible d'impacter successivement différents compartiments de l'environnement au fur et à mesure des transferts et transformations de l'azote jusqu'à son retour à l'état d'azote moléculaire  $N_2$  inerte. La fabrication d'engrais minéraux azotés et phosphatés fait appel à des ressources non renouvelables et est à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre en amont de l'exploitation agricole pour la fabrication et le transport des engrais. Ce double constat met en exergue l'importance d'un premier groupe de leviers, visant à **réduire la dépendance des agrosystèmes aux engrais minéraux de synthèse** en diversifiant les entrées d'azote (e.g. légumineuses), en améliorant l'efficacité de prélèvement et d'utilisation des éléments minéraux par les cultures et en favorisant le recyclage des produits organiques :

- Augmenter la part des **légumineuses** dans les systèmes de culture et les prairies, afin d'augmenter l'entrée d'azote dans les écosystèmes cultivés par fixation symbiotique. En France la surface en protéagineux a fortement diminué depuis les années 90, et on assiste à une sorte de "verrouillage" tendant à exclure de plus en plus ces espèces des systèmes de grande culture du fait de la raréfaction des possibilités de collecte, des débouchés, de la disponibilité en conseils techniques. Les surfaces en légumineuses fourragères pures ont également fortement diminué depuis les années 60 du fait de l'évolution des modes d'alimentation animale (usage massif de soja importé) et de la ségrégation géographique entre zones de production animale et de production végétale. L'accroissement des surfaces en légumineuses passe largement par l'identification de débouchés nouveaux, en alimentation humaine et animale ou pour l'extraction de composés à forte valeur ajoutée. L'amélioration des performances économiques des systèmes à base de légumineuses est nécessaire, ainsi qu'une évaluation environnementale comparée des différentes voies d'approvisionnement en protéines végétales. L'effort d'amélioration génétique des espèces légumineuses étant relativement récent, des possibilités de progrès importantes existent pour augmenter et stabiliser leur rendement. Une plus grande connaissance du fonctionnement de la symbiose permettrait d'en optimiser les services attendus. Au-delà de la question des débouchés et des performances économiques des systèmes incluant des légumineuses, un renouvellement de l'intérêt pour ces espèces passe par leur intégration dans une démarche globale d'agroécologie à même de valoriser l'ensemble des possibilités d'insertion dans les systèmes de culture (e.g. légumineuses en culture principale ou en interculture, légumineuses en culture pure ou en association,...) et l'ensemble des services rendus (apport d'azote à valoriser à l'échelle pluriannuelle, rupture du cycle des pathogènes,...).

- Accroître **l'efficacité de prélèvement et d'utilisation** des éléments minéraux N et P par les cultures et les animaux et **réduire les fuites vers l'environnement**. Certains leviers, de nature technique, sont d'ores et déjà disponibles comme l'ajustement des apports aux stricts besoins des cultures ou des animaux (outils de raisonnement et de pilotage de la fertilisation ou des rations, localisation des engrais, choix des dates et des formes d'apport,...), les cultures intermédiaires ou intercalaires permettant d'immobiliser temporairement l'azote minéral dans la biomasse pour éviter sa lixiviation, la couverture des fosses de stockage d'effluents et le brûlage ou la méthanisation, l'enfouissement des produits organiques à l'épandage pour éviter la volatilisation ammoniacale, la présence de motifs paysagers (bandes enherbées, haies, zones humides naturelles ou artificielles) réduisant le risque érosif et favorisant l'interception du P associé aux particules terreuses lors d'épisodes de ruissellement (bandes enherbées, haies), les rangées d'arbres permettant l'interception d'azote ammoniacal volatilisé et les zones humides permettant d'abattre la charge en nitrate des eaux par dénitrification. D'autres leviers,

jouant sur des interactions biotiques, nécessitent un effort supplémentaire de recherche et de développement pour devenir opérationnels comme l'utilisation des symbioses mycorhiziennes pour accroître le prélèvement du P, l'orientation du fonctionnement des communautés microbiennes telluriques et rhizosphériques dans un sens facilitant l'acquisition des ressources minérales par les plantes et la réduction des émissions, ou encore l'association d'espèces ou le choix de successions pour la facilitation de l'accès aux ressources minérales (exemple du lupin qui peut solubiliser du P peu disponible au profit des autres espèces). Le levier génétique (e.g. amélioration de l'efficacité de prélèvement des espèces cultivées par sélection sur des traits racinaires) reste largement à explorer.

- Accroître le **recyclage**, via une meilleure valorisation des effluents d'élevage, voire une mobilisation accrue d'autres ressources organiques, dont des ressources urbaines, dès lors que leur innocuité serait avérée (composts,...). Un progrès significatif est d'ores et déjà possible par une prise en considération plus juste des apports d'éléments minéraux fournis par les produits organiques, lesquels sont généralement sous-estimés, ce qui conduit à des fertilisations minérales de complément excédentaires. En situation d'excédent structurel (cas des zones d'élevage intensif), les marges de manœuvre sont dans l'organisation d'échanges entre zones de production animale et végétale, soit de matières brutes sur de courtes distances, soit après mise en œuvre de procédés de tri et/ou de transformation permettant de réduire la charge pondérale et de favoriser les échanges sur de plus longues distances (e.g. séparation des phases liquides et solides,...) (Encadrés 1 et 2). L'évaluation environnementale globale de ces différentes pistes doit être effectuée. A plus long terme des scénarios de relocalisation des productions végétales et animales, combinés ou pas à des technologies de transformation des effluents, favorisant globalement le recyclage des ressources et leur valorisation (production d'énergie par méthanisation et retour au sol des éléments minéraux) sont à explorer.

**Encadré 1:** Un exemple de procédé technologique pour le recyclage du Phosphore

Dans les régions d'élevage, les effluents d'élevage représentent une source majeure de P renouvelable. Un procédé innovant développé à Irstea (Daumer et al, 2010 ; 2013) permet de produire de la struvite\* en séparant le P de la matière organique. Le phosphore est d'abord dissous par l'ajout d'acide, la phase enrichie est ensuite séparée et finalement le P est précipité sous forme de struvite. Après une phase d'essais en batch au laboratoire, un pilote fonctionnant en continu a été développé et validé (Figure 1).

Le lisier est d'abord acidifié à pH 4.5 par ajout d'acide formique, puis filtré sur une table d'égouttage (tamis de 360  $\mu\text{m}$ ) après ajout d'un polymère. Le cristallisateur est un réacteur agité de 10L qui comprend la zone de mélange-agitation, une zone supérieure de sédimentation et une zone morte inférieure, dans laquelle de larges cristaux s'accumulent. De la magnésie en suspension ( $\text{MgO}$ ) est ajoutée à  $100 \text{ g.L}^{-1}$  à la fois pour apporter le Mg et pour augmenter le pH. La concentration initiale en P dans le lisier se situait entre 800 et  $1100 \text{ mg.kg}^{-1}$ . L'étape d'acidification permet de dissoudre environ 80% de ce P total. L'étape de cristallisation permet d'éliminer 95 à 99% du P de la phase liquide. Le solide récupéré est un mélange de struvite, de phosphate de calcium amorphe (ACP) et de  $\text{MgO}$ . A l'issue de cette phase pilote un prototype à échelle 1 est en cours d'expérimentation et de validation. Ceci est destiné à tester les aspects sécurité chimique à la ferme ainsi que les données économiques.

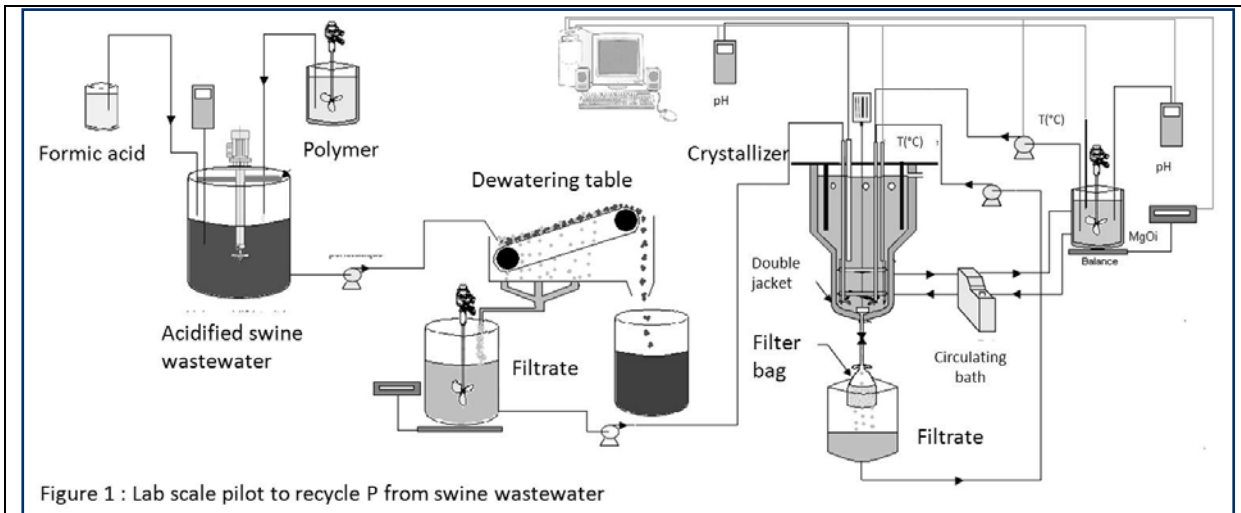
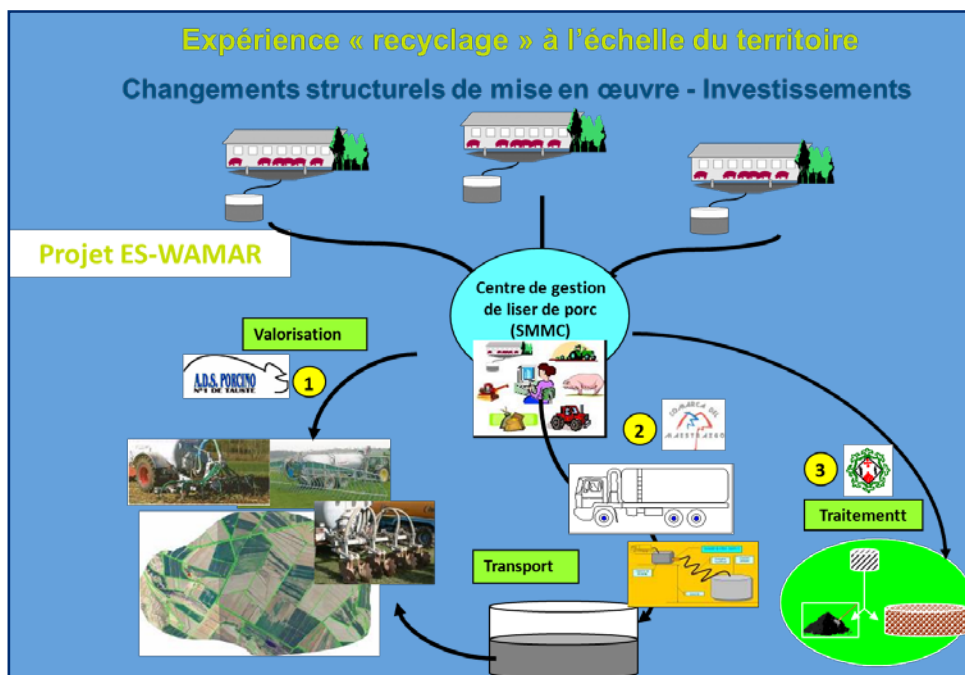


Figure 1 : Lab scale pilot to recycle P from swine wastewater

\*( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ , forme cristalline obtenue à partir du P dissous est un engrais dont l'efficacité est comparable à celle des engrais issus de la chimie).

**Encadré 2:** Leviers organisationnels pour accroître le recyclage à l'échelle d'un territoire. Exemples de scénarios de gestion collective des effluents porcins dans la province d'Aragón en Espagne

L'objectif de ce projet visait la démonstration sur le terrain de la possibilité de mettre en œuvre trois scénarii distincts de gestion des lisiers de porcs pour favoriser le recyclage et/ou réduire les impacts environnementaux dans trois régions de la province espagnole d'Aragón. La mise en œuvre de chaque scénario s'est appuyée sur la création d'une entreprise locale de gestion des lisiers (SWME) regroupant au moins 30 exploitations : (i) meilleure répartition des effluents sur les cultures en zone de surfaces d'épandage suffisantes à Tauste, (ii) transport combiné réseau hydraulique/route des exploitations de productions porcines vers les exploitations de productions végétales proches à Maestrazgo, et (iii) traitement pour limiter la charge en azote et en phosphore à Peñarroya de Tastavins où les surfaces d'épandage sont largement insuffisantes. Le fonctionnement des trois entreprises locales s'appuie sur l'utilisation d'un logiciel spécifique de gestion des déjections.



L'agriculture contribue aux émissions de gaz à effet de serre (20% des émissions en France), mais elle peut aussi favoriser l'atténuation du réchauffement climatique en réduisant ses émissions, en favorisant le stockage de carbone organique dans les sols et la biomasse et en contribuant à la production d'énergie renouvelable (biomasse, biogaz,...). La prise en compte de cet enjeu émergent est central dans le cadre de la transition agro-écologique car les systèmes agricoles proposés devront à l'avenir concilier des objectifs d'adaptation au changement climatique, de maintien voire d'augmentation de la production et d'atténuation des émissions. Certains leviers techniques évoqués dans le paragraphe ci-dessus pour réduire la dépendance des agrosystèmes aux engrais de synthèse contribuent à l'objectif d'atténuation des émissions, notamment de N<sub>2</sub>O. D'autres leviers permettent de **favoriser le stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse**. Il s'agit notamment :

- du **maintien des prairies permanentes**, et de **l'allongement de la durée des prairies temporaires**. Sous prairie permanente le stock de carbone organique est en moyenne 1.5 fois plus élevé que sous culture. A surface équivalente le maintien d'une prairie temporaire sur 4 ans permet un stockage de carbone plus important que deux séquences de prairie de 2 ans disjointes dans le temps ou dans l'espace.

- de la **réduction du travail du sol** (semis direct, labour occasionnel, travail superficiel). Certains résultats récents ont conduit à revoir à la baisse le potentiel de stockage additionnel de carbone dans le sol en non labour car celui-ci serait non systématique, et moindre que ce qui avait été écrit précédemment (Dimassi et al., 2014). Cette pratique garde cependant tout son intérêt du fait de la moindre consommation d'énergie (et donc d'émission de CO<sub>2</sub>) et vis-à-vis d'autres enjeux (réduction du risque érosif par ex). Un effort complémentaire d'acquisition de données sur le bilan gaz à effet de serre complet (stockage additionnel de C, émission de N<sub>2</sub>O,...) des différentes pratiques de travail du sol est nécessaire, en fonction du contexte pédoclimatique. L'évaluation multicritère de ces pratiques est également indispensable (effet sur le recours aux herbicides notamment).

- de l'ensemble des pratiques favorisant **la couverture permanente du sol**, accroissant par là même les entrées de carbone et/ou son stockage dans les sols et la biomasse comme les cultures intermédiaires et intercalaires, les bandes enherbées, les mulchs vivants, l'agroforesterie et les haies. Outre leur effet favorable sur le stockage de C la plupart de ces pratiques ont aussi un effet positif vis-à-vis d'autres enjeux (réduction des fuites de nitrate, limitation du risque érosif, préservation de la biodiversité et esthétique des paysages)

A l'ensemble des leviers techniques évoqués ci-dessus, se plaçant plutôt à l'échelle de la parcelle et du système de culture, s'ajoutent d'autres leviers permettant d'**optimiser la gestion des cycles biogéochimiques à l'échelle des territoires**, via le choix d'un usage des sols et de cultures tenant compte du pédoclimat et des risques de fuite associés (lixiviation d'azote, transfert de P par érosion,...) et l'aménagement des paysages (introduction d'espaces semi-naturels aux endroits appropriés, etc...). A l'évidence, ces leviers, mobilisables pour une meilleure gestion des cycles biogéochimiques, doivent aussi considérer d'autres enjeux (e.g. gestion quantitative de l'eau, biodiversité,...), avec dans certains cas des synergies à valoriser (e.g. intérêt des motifs paysagers pour la préservation des auxiliaires de culture) mais aussi des antagonismes possibles (e.g. abatement de la charge en nitrate mais production de N<sub>2</sub>O dans les zones humides).

### **3. Conclusion : des leviers à différents niveaux d'organisation spatiale, et pour différents horizons temporels.**

En termes de gestion des cycles biogéochimiques, la transition agro-écologique reprend à son compte beaucoup d'objectifs qui ont mobilisé l'appareil de recherche-développement-formation depuis plusieurs décennies, comme la réduction des fuites d'azote et de phosphore vers l'environnement. La démarche dans laquelle elle s'insère suppose cependant une prise en compte accrue d'autres objectifs, comme la

gestion des ressources non renouvelables utilisées pour produire des fertilisants, déplaçant la réflexion du raisonnement de la fertilisation à la gestion durable des cycles biogéochimiques dans leur ensemble. Il en résulte un cahier des charges plus exigeant, mais aussi un spectre de leviers mobilisables élargi. Une première analyse montre que ces leviers peuvent être techniques et/ou organisationnels et concerner différents niveaux (parcelle, exploitation, territoire, filière,...). Il apparaît aussi qu'un nombre significatif de ces leviers sont mobilisables dès maintenant, mais que d'autres supposent un effort supplémentaire de recherche et/ou de développement.

### Références bibliographiques

Actes du colloque agroécologie, 2013. [www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Tous-les-dossiers/L-agro-ecologie-a-l-Inra-la-recherche-s-organise/Atelier-boucler-les-grands-cycles](http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Tous-les-dossiers/L-agro-ecologie-a-l-Inra-la-recherche-s-organise/Atelier-boucler-les-grands-cycles)

Daumer M.L., Picard S., Saint-Cast P., Dabert P., 2010. Technical and economical assessment of formic acid to recycle phosphorus from pig slurry by a combined acidification – precipitation process. *Journal of Hazardous Materials* 180 (1-3), 361-365.

Daumer M.L., Santellani A.C., Capdevielle A., Diara A., 2013. Development of a new continuous pilot process recycling phosphorus from pig slurry. In *ManuReSource Conference*, 5-6 December 2013, Bruges (Belgique).

Dimassi B., Mary B., Wylleman R., Labreuche J., Couture D., Piraux F., Cohan JP., 2014. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture Ecosystems & Environment* 188, 134-146.

Galloway J., Townsend A.R., Erisman J.W., Bekunda M., Cai Z., Freney J.R., Martinelli L.A., Seitzinger S.P., Sutton M.A., 2008. Transformations of the Nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions. *Science* 320, 889-892.

Senthikumar K., Nesme T., Mollier A., Pellerin S., 2012. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: The importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92, 145-159.