HAL open science

Boucler les grands cycles biogéochimiques

Jean-Louis Peyraud, Guy Richard, Chantal Gascuel

To cite this version:

Jean-Louis Peyraud, Guy Richard, Chantal Gascuel. Boucler les grands cycles biogéochimiques. Innovations Agronomiques, 2015, 43, pp.177-186. hal-01215774

HAL Id: hal-01215774

https://hal.science/hal-01215774

Submitted on 27 May 2020

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

Innovations Agronomiques 43 (2015), 177-186

Boucler les grands cycles biogéochimiques

Peyraud J.-L.[1], Richard G.[2], Gascuel-Odoux C.[3]

[1] UMR PEGASE Rennes et Direction scientifique Agriculture

[2] Département Environnement et Agronomie

[3] UMR SAS Rennes et Direction Scientifique Environnement

Correspondance : chantal.gascuel@rennes.inra.fr ; Jean-Louis.peyraud@rennes.inra.fr

Résumé

Les transitions agroécologiques visent à favoriser le bouclage des grands cycles pour limiter les pertes et gaspillages, et pour maitriser des impacts environnementaux négatifs. Ces transitions combinent une série de leviers : fixation biologique d'azote, stockage de carbone et de nutriments dans la matière organique des sols, recyclages et valorisation des engrais de ferme, intégration plus étroite des systèmes de culture et d'élevage. Ces leviers mobilisent des recherches sur la biologie et l'écologie des sols, sur les symbioses racinaires, sur les cycles biogéochimiques et sur les technologies et options de recyclage et de valorisation des effluents, y compris des effluents d'origine urbaine. Cette synthèse s'appuie sur des exemples concrets illustrant comment agir sur les cycles biogéochimiques pour accroitre l'accès aux ressources, améliorer leur efficience et limiter les fuites vers l'environnement. La modélisation, l'expérimentation dans des dispositifs contrôlés et au champ, l'observation long terme sont au cœur des recherches à entreprendre. Les actions se déclinent à différentes échelles d'espace, d'échelles fines telles que les interactions sol-plante aux territoires.

Mots-clés : Carbone, azote, phosphore, agroécologie, cycles biogéochimiques, sol, légumineuses.

Abstract: Closing the main biogeochemical cycles

Agro-ecological transitions are intended to close the cycle of major elements to decrease losses and waste, and to reduce negative environmental impacts. They combine several levers: biological nitrogen fixation, carbon and nutrients storage in the soil organic matter, recycling and agronomic utilization of manure, improved integration between crop and livestock production systems. Improving efficiency of all these levers mobilize research on soil biology and ecology, root symbioses, biogeochemical cycles and technologies for better recycling and recovery of waste, including waste from urban areas. This synthesis is based upon case studies illustrating how to act on biogeochemical cycles to increase plant access to nutrients, to improve nutrient efficiency and to decrease nutrient emissions to the environment. Research to be undertaken will rely on modelling, controlled laboratory and field experiments as well long term observatories. The practical implications will take place at different levels in space, from plant soil interaction in the rhizosphere to territory.

Keywords: Carbon, nitrogen, phosphorus, agro-ecology, biogeochemical cycles, soil, legumes

Introduction

Les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore ont été profondément modifiés ces dernières décennies par l'intensification, la spécialisation et la concentration géographique des activités agricoles (Galloway et al., 2008). La consommation des végétaux (fourrages verts ou conservés, grains,…) par les animaux découple plus ou moins les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore.

L'animal émet des composés azotés très mobiles dans l'urine, composés qui peuvent très rapidement conduire à des émissions de NH_3, NO_2 ou NO_3. De plus, les ruminants émettent du méthane, en contrepartie de leur capacité à recycler l'essentiel du carbone de la biomasse cellulosique (fourrages, pailles des céréales). Les productions animales intensives font souvent appel à une alimentation animale extérieure au territoire, déséquilibrant alors fortement les bilans d'éléments, notamment dans le cas des ateliers hors sol. Les formes réactives de l'azote et du phosphore sont beaucoup plus abondantes depuis quelques décennies, entrainant des pollutions de l'eau et de l'air par notamment des émissions de gaz à effet de serre ; le stock de carbone des sols a diminué dans certaines zones géographiques. Les pratiques en agriculture et en élevage, à la base des productions végétales et animales, sont questionnées (Bonaudo et al., 2014 ; Dumont et Bemues, 2014). Ces quelques considérations mettent en évidence l'importance d'optimiser, voire de repenser la boucle cultures–aliments–animaux-effluents–sol pour une agriculture plus efficiente, limitant ses émissions dans l'environnement.

Les transitions agroécologiques visent à favoriser le bouclage des grands cycles pour limiter les pertes et gaspillages et diminuer les émissions vers l'environnement. Elles combinent différents leviers : fixation biologique d'azote, stockage de carbone et de nutriments dans la matière organique des sols, recyclage et valorisation des engrais de ferme, intégration plus étroite des systèmes de culture et d'élevage. Le potentiel représenté par ces transitions peut être renforcé grâce à des recherches sur la biologie et l'écologie des sols, sur les symbioses racinaires, sur les cycles biogéochimiques, sur les technologies et options de recyclage et de valorisation des effluents, y compris des effluents d'origine urbaine (Thomas et al., 2014). Comment favoriser la fermeture des cycles dans de nouveaux systèmes de production agricole ? Quels sont les bénéfices attendus ? Quelles sont les pistes d'innovation ? Quelles mesures envisager pour faciliter ces transitions ?

Cet article constitue la synthèse d'un atelier du colloque Agroécologie qui s'est tenu le 17 Octobre 2013, atelier intitulé « Boucler les grands cycles biogéochimiques ». Cet atelier s'est organisé autour de trois séquences cherchant à : 1) montrer les retours d'expériences de gestion agroécologique mises en œuvre ('aujourd'hui') ; 2) expliciter les pistes de recherches et les démarches en cours pour de nouveaux développements d'action ('les possibles') ; 3) analyser les verrous et les voies pour des innovations ('l'avenir').

1. Aujourd'hui : des expériences et compétences mobilisées diverses

Les innovations portent sur trois leviers : (1) une meilleure utilisation des légumineuses, interrogeant leur gestion à la parcelle et le développement de nouvelles filières à l'échelle du territoire, (2) une meilleure maîtrise du fonctionnement biologique des sols et (3) le développement de procédés à l'échelle de l'exploitation ou du territoire, faisant appel aux écotechnologies.

Plusieurs exemples montrent l'intérêt d'utiliser des légumineuses, seules ou en association, en particulier dans les systèmes en agriculture biologique et dans des systèmes de culture mieux couplés à l'élevage. Les légumineuses permettent notamment de :

- Favoriser des entrées d'azote par des processus biologiques naturels (fixation symbiotique de l'azote), limitant ainsi les intrants (fertilisation organique et minérale),
- Mieux mobiliser les ressources nutritionnelles du sol, dans l'espace et le temps, grâce à leurs systèmes racinaires étendus,
- Favoriser les recyclages entre les productions végétales et animales.

Il en résulte généralement une meilleure performance de la culture suivante, une économie d'engrais et une diminution du risque de lixiviation du nitrate, lorsque les reliquats post culture sont bien valorisés par la rotation mise en place. L'intérêt des légumineuses doit s'analyser dans le cadre du système de culture (assolement, succession culturales). Elle constitue une des voies explorées par des « projets

domestiques » mis en place dans un cadre européen pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et générer des crédits carbone. En ce qui concerne le couplage cultures-élevage, l'évolution des pratiques culturales a permis la réduction des excédents azotés dans les fermes laitières de Bretagne. La répartition territoriale des cultures et des zones d'épuration est une autre dimension à prendre en compte pour réussir ce couplage. De même, la dimension internationale doit être considérée, alors que les échanges internationaux de légumineuses peuvent induire de forts déséquilibres entre les entrées et le potentiel de retour au sol : il faut ainsi, dans certaines régions, limiter le recours aux importations de soja, sources protéiques bien valorisées dans l'alimentation des animaux, mais qui ne rendent pas les services écosystémiques d'une culture protéagineuse locale et induisent au final des excédents d'azote et de phosphore au sol.

Les technologies développées concernent d'abord l'évaluation des flux d'azote et les équipements d'épandage permettant une fertilisation raisonnée, reconnue par la certification Ecoépandage. Ensuite, le développement de nouveaux procédés vise essentiellement la gestion des effluents d'élevage, par la méthanisation à la ferme, l'extraction de l'azote et du phosphore des lisiers, afin d'externaliser ou de recycler au mieux les excédents qui ne pourraient être assimilés dans les cycles biogéochimiques des agrosystèmes à proximité immédiate des élevages.

Concernant l'utilisation des légumineuses, les savoirs mobilisés sont au carrefour de l'agronomie et de l'écologie fonctionnelle et font appel à de nombreuses disciplines, la biologie végétale, l'écophysiologie, la microbiologie des sols, l'agronomie. Les innovations autour de la fixation symbiotique mobilisent la génétique et la génomique, notamment pour optimiser la fonction de fixation symbiotique des légumineuses, les relations hôtes-symbiote et l'exploration spatiale du sol par une architecture racinaire optimale. L'écophysiologie apporte des connaissances pour comprendre le fonctionnement des peuplements complexes, comprenant notamment des légumineuses. La biologie et la microbiologie des sols permettent l'investigation des communautés microbiennes du sol, de leur rôle sur les cycles du carbone et de l'azote, l'identification des gènes impliqués dans les fonctions relatives à ces cycles (fixation, dénitrification,…) et l'analyse des effets des pratiques sur ces processus, tels que les effets des modalités de restitution des effluents d'élevage au sol ou encore les modalités de travail du sol. La biogéochimie intègre ces fonctionnements, en relation soit avec les dynamiques des microorganismes du sol, soit avec les conditions physico-chimiques de pH ou de redox, pour expliquer les couplages entre cycles du carbone, de l'azote et du phosphore à différentes échelles, mais aussi les transferts d'éléments qui leur sont liés (métaux tel que Cuivre et Zinc,…).

Concernant, l'évolution des techniques, l'agronomie au sens large et les sciences animales apportent les connaissances sur la gestion des cultures, notamment sur les peuplements multi espèces et les rotations, ainsi que sur la nutrition animale et les possibilités de réduire les apports, et au final les rejets d'azote et de phosphore. Comprendre ces cycles, c'est permettre d'adapter la gestion des cultures aux phases de libération des nutriments, c'est développer des associations végétales (cultures annuelles et prairies) où les proportions des différentes espèces peuvent être maîtrisées, permettant *in fine* d'avoir un pool végétal en constante assimilation des nutriments libérés dans le sol. C'est aussi concevoir des complémentarités raisonnées entre élevage et culture, recherchant les synergies pour l'utilisation des ressources végétales (et de leur co-produits) par les animaux, et la valorisation des éléments contenus dans les effluents pour la production végétale, et plus globalement pour la durabilité des sols. Dans le cas des ruminants un rôle particulier est dévolu à la prairie et à ses modes d'exploitation (fauche ou pâturage) et son positionnement sur le territoire qui auront des incidences en terme de stœchiométrie, c'est-à-dire de transmission des pools de C, N et P au long de la chaîne trophique, notamment du végétal à l'animal, et de leurs retours au sol.

Les savoirs mobilisés sont aussi transversaux et font appel à la modélisation, notamment la modélisation multi-échelle des flux de C, N et P dans les différents compartiments de l'environnement, l'évaluation *ex ante* des systèmes de productions et de cultures, par des outils d'analyse multicritères. Ainsi, l'outil SIMEOS-AMG permet d'orienter la décision des agriculteurs afin de mieux gérer la matière

organique des sols (http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/en-savoir-plus-actus/96-simeos-amg). Les exemples présentés ont montré l'importance de la coordination des acteurs, notamment par la mise en place de réseaux d'acteurs à l'échelle régionale. Des actions de formation sont également entreprises afin de constituer des réseaux de compétences et de disséminer les innovations venant des agriculteurs.

2. Les possibles : de nombreuses pistes de recherche allant de la génétique à la modélisation multi-échelles

Les pistes de recherche couvrent un champ d'investigation extrêmement large (Figure 1), concernant différents compartiments de l'environnement et systèmes de production (sol, plante, animal).

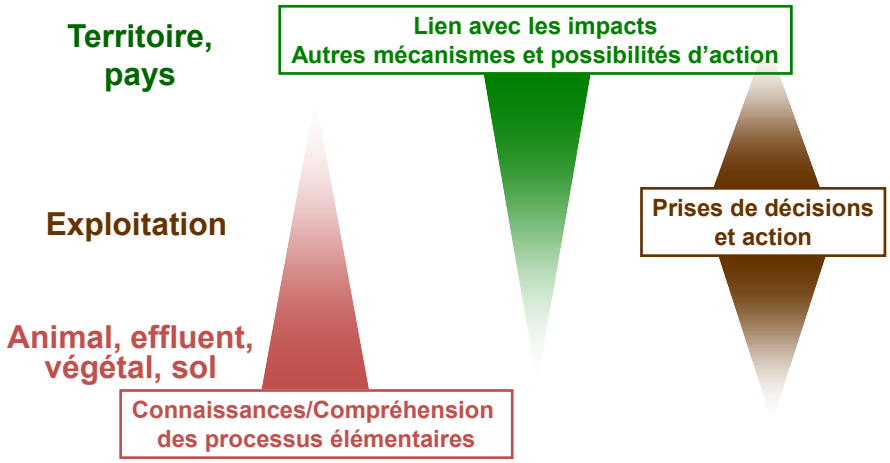

Figure 1 : Les différents niveaux d'analyse pour le bouclage des cycles biogéochimiques.

A l'échelle locale, et au niveau du sol, il s'agit de mieux piloter la dynamique de la flore microbienne du sol, par le choix des espèces et des variétés, d'introduire des rhizobium permettant de réduire le N_2O du sol en N_2 (Bourion et al, 2015), de développer des conduites de travail du sol aptes à mieux stocker du carbone. En ce qui concerne les plantes, l'accès à de larges collections de ressources génétiques et de mutants permet d'identifier des génotypes aux caractéristiques intéressantes pour la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Des expérimentations au champ ont montré que les génotypes de pois effectuent un choix parmi les souches de Rhizobium indigènes présentes dans le sol (Bourion *et al.*, 2007; Laguerre *et al.*, 2007) (Figure 2). Plus généralement, l'étude des interactions plantes-microorganismes ouvre un champ d'application important pour améliorer la nutrition des plantes à bas niveau d'intrants. Enfin, le transfert des compétences des légumineuses à d'autres espèces d'intérêt constitue une voie particulièrement innovante pour créer des génotypes aptes à utiliser les différentes formes de l'azote polluantes pour l'eau et l'air (NH_4^+, NO_3^- comme les non légumineuses, mais aussi N_2O). Au niveau de l'animal, il s'agit de réduire les émissions de méthane entérique, et plus généralement d'améliorer l'efficacité digestive et la robustesse à l'utilisation de régimes alimentaires sub-optimaux ainsi que de limiter les émissions (CH_4, NH_3, $N0_3$, N_2O) liées à la gestion des effluents.

A une échelle plus large, celle de l'exploitation, du territoire, les pistes consistent à améliorer les outils d'aide à la décision pour la gestion des matières organiques et la fertilisation des cultures. L'objectif est de développer des approches systémiques et intégrées des systèmes de production et des territoires. A l'échelle du système d'élevage, les recherches évoluent vers un véritable phénotypage environnemental concernant l'animal, le troupeau, les effluents, les pratiques et le contexte climatique. La modélisation

doit permettre de dégager les complémentarités entre les différents niveaux d'intervention et les risques de transfert de pollution.

L'analyse de la robustesse des innovations tient en plusieurs défis : obtenir une meilleure régularité des rendements, notamment sur les légumineuses ; avoir des fourrages ou des méteils pouvant mieux valoriser l'eau en période hivernale pour leur croissance, par exemple par des mélanges de type céréales-protéagineux (qui peuvent toutefois poser la question de la bonne recharge des nappes), mais pouvant aussi mieux résister à la sécheresse ; la recherche de nouveaux compromis entre conduite des ruminants et production fourragère, par exemple en faisant mieux coïncider la période des vêlages avec celle de la production maximale de fourrage. Une robustesse des cultures plus importante vis-à-vis de la variabilité climatique est attendue de la recherche. Les émissions de formes azotées et phosphorées vers l'eau et l'air sont en effet pour partie liées à la variabilité climatique, les périodes de sécheresse ne permettant pas le développement des cultures et engendrant donc des excès de nutriments par non consommation de la fertilisation prévue, les périodes humides étant celles de transfert et de biotransformation très actives, génératrice d'émissions vers l'eau. Concevoir des agrosystèmes résistant à la variabilité climatique est un défi. Les transitions fragilisent les systèmes et la question des instruments à mettre en place pour limiter les conséquences des aléas climatiques (assurance, solidarités,…) est posée.

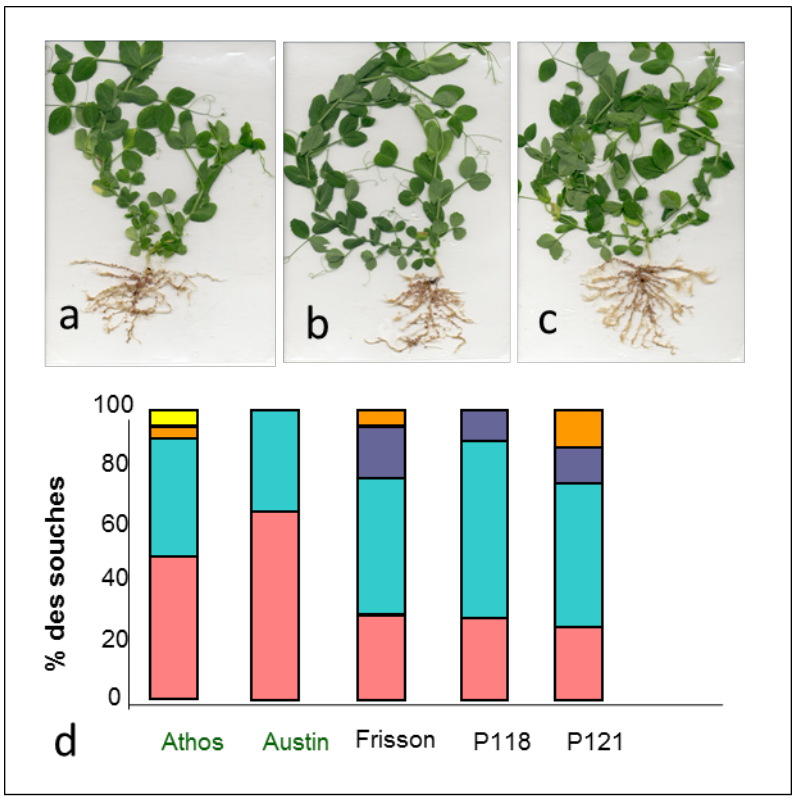

Figure 2 : Trois génotypes de pois présentant des architectures contrastées de racines nodulées (a. Frisson, b. P118, c. P121) montrent une variabilité du choix de souches de Rhizobium parmi celles présentes de façon indigène au champ. Deux variétés cultivées sont aussi analysées dans cet essai (Athos, Austin). Chaque type de souche est symbolisé par une couleur différente (Bourion et al., 2007 ; Laguerre et al., 2007). Différentes combinaisons variétés x souches de rhizobium / mycorhizes sont testées pour améliorer l'architecture racinaire et la tolérance aux stress (programme PeaMust, Coord. J. Burstin).

La conception des systèmes agricoles innovants peut s'appuyer sur des approches systémiques multi-échelles d'un point de vue à la fois spatial et temporel. C'est le cas du projet Casdar Girovar (Figure 3).

Au niveau spatial, le niveau de l'exploitation est le niveau pertinent pour aborder les systèmes de culture, les systèmes d'élevage et leur complémentarité. Le niveau territoire permet une quantification des flux d'éléments chimiques, tant sous forme d'aliments que d'effluents, tant sur des courtes que des longues distances. Prendre en compte les impacts de ces flux est essentiel pour évaluer les systèmes agricoles. Au niveau temporel, il s'agit de mieux prendre en compte les effets de long terme, effets de stockage et déstockage de l'azote, du phosphore et du carbone, ces effets pouvant s'inscrire sur plusieurs décennies. De manière plus subtile, les écosystèmes sont modifiés par des accumulations dans les sols et les nappes, modifiant les communautés de microorganismes, et donc les fonctions biogéochimiques des sols. Le couplage des modèles de flux de C, N et P avec les modèles de dynamique des communautés microbiennes est un enjeu pouvoir prendre en compte la biodiversité de ces communautés et pas seulement leur biomasse.

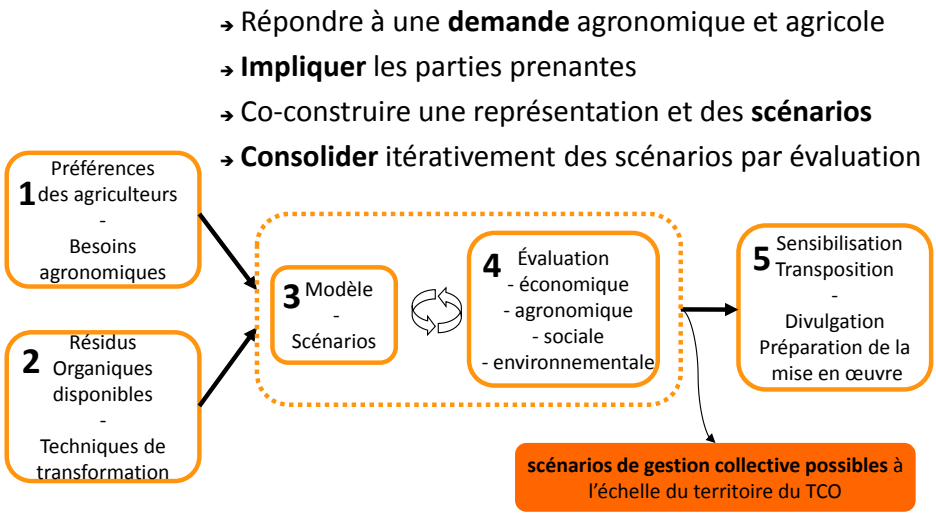

Figure 3 : Projet Casdar Girovar : Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à La Réunion (Wassenaar et al., 2015).

Finalement, il est attendu des agroécosystèmes des services de production et de régulation vis-à-vis des cycles biogéochimiques. Ces services peuvent être conflictuels, antagoniques, spécifiques pour un contexte donné. Une approche multi-services, de bouquet ou panier de services, des agroécosystèmes est attendue, de manière à mieux connaitre les synergies ou au contraire les trade-off entre services qui seraient à arbitrer et mieux objectiver, ceux qui sont à privilégier (éventuellement à rémunérer) en fonction de tel ou tel contexte.

Les méthodes ou dispositifs utiles à mobiliser pour la transition agroécologique sont nombreux : plateforme expérimentale de mesure des émissions atmosphériques issues des bâtiments d'élevage (Megeve à Rennes), plateforme expérimentale sur l'approche intégrée de chaines de production, collecte, transformation et valorisation d'effluents d'élevage (Rennes), dispositifs d'expérimentation long terme sur les agrosystèmes (SOERE PRO, ACBB, respectivement dédiés aux effets liés à des apports d'effluents d'élevage et aux agrosystèmes), dispositifs d'expérimentation système (PIC, SFI, Mirecourt, Epoisses, Lusignan, AlterAvi) d'ores et déjà situés dans le champ de l'agroécologie, dispositifs d'expérimentation territoire que constituent les zones ateliers (SOERE ZA), dispositifs d'observations territoriaux que constitue le réseau des bassins versants (SOERE RBV), les enquêtes et suivis de réseaux d'exploitation (ECOPHYTO,…), les démarches participatives. L'enjeu est d'inscrire plus encore ces dispositifs dans le champ de l'agroécologie.

Les approches d'évaluation, que ce soit par l'analyse multicritère ou par la modélisation, participent à la conception des agroécosystèmes. Les méthodes d'analyse multicritère sont nombreuses et font l'objet

de développements méthodologiques constants (plateforme Means à Rennes). Il s'agit des méthodes ACV, d'outils tels que ceux présentés dans la plateforme Plage (dont MASC), des modèles d'évaluation *ex ante* à différentes échelles (TNT,…). Ces modèles posent le défi de la transposition, c'est-à dire de l'adaptation de la représentation à une situation spécifique et de la calibration sur des systèmes non ou faiblement connus (peu de recul, peu de données), et du coup, la difficulté à prévoir les impacts dans des contextes opérationnels, à prévoir la variabilité des réponses aux aléas (climatiques, économiques,…). Toutes ces méthodes se heurtent aux difficultés du changement d'échelle (spatiale mais aussi temporelle). Elles évaluent souvent des systèmes à l'équilibre et ne permettent pas d'évaluer leur robustesse face à des chocs (économiques, climatiques ou sanitaires), ni d'analyser les transitions et leurs effets. Il faut ici définir un nouveau type de modèle qui permette d'anticiper et évaluer les trajectoires d'évolution des systèmes agricoles. La dimension temporelle interroge aussi les modalités de transitions des systèmes et les risques tant sur les émissions que sur la prise de risque elle-même que constitue un changement de système agricole.

3. L'avenir : des leviers technologiques aux facteurs sociaux du changement

Des avancées technologiques devraient permettre de contribuer à un meilleur bouclage des cycles biogéochimiques. Ces avancées se situent sur des plans très différents. L'acquisition et le traitement de données de séquençage et phénotypage à haut débit contribueront à identifier les déterminants des fonctions, notamment symbiotiques, et permettront au travers de la sélection d'optimiser ces fonctions (amélioration des interactions biotiques bénéfiques entre plantes et microorganismes du sol pour une meilleure nutrition N et P, optimisation du microbiote digestif des animaux pour une meilleure digestion et santé animale). Ces travaux constituent une nouvelle frontière de science.

Un levier majeur est d'optimiser la boucle culture-aliment-effluents à l'échelle territoriale (Peyraud et al., 2014). Il s'agit alors de mieux analyser et valoriser des données « systémiques », liées aux systèmes de culture et d'élevage. Les bases de données issues du suivi de réseaux d'exploitations sont particulièrement riches de ce point de vue (par exemple AgroSyst, et Diapason). Le travail réalisé autour d'AgroPeps, pour capitaliser les innovations et créer une plateforme interactive, amplifiera cette dimension systémique.

Les progrès peuvent également venir de l'agriculture et de l'élevage de précision, limitant les entrées dans l'espace et le temps, au plus près des besoins des plantes et des animaux, du respect des objectifs environnementaux. Ces agricultures de précision se baseront sur une meilleure information, permettant une adaptation tactique des interventions sur les cultures ou les animaux à partir d'informations fournies en temps réel par des (bio)capteurs fixes ou embarqués sur les machines, les automates ou les animaux et/ou capitalisation de ces données enregistrées. Le développement d'agro-équipements est intéressant pour accompagner ces évolutions. Il concerne le secteur des cultures, avec des équipements aptes à gérer une diversité accrue (cultures associées,..) et de fonctions (semis, semis intercalaire, binage, désherbage,…) ou d'assurer le triage des grains à la récolte. Il concerne aussi le secteur des matériels de récolte de fourrages et de gestion des surfaces en herbe (décision de conduite des troupeaux en fonction des caractéristiques des couverts). Il concerne enfin les robots en élevage qui permettent d'automatiser des décisions dans le domaine de l'alimentation par exemple.

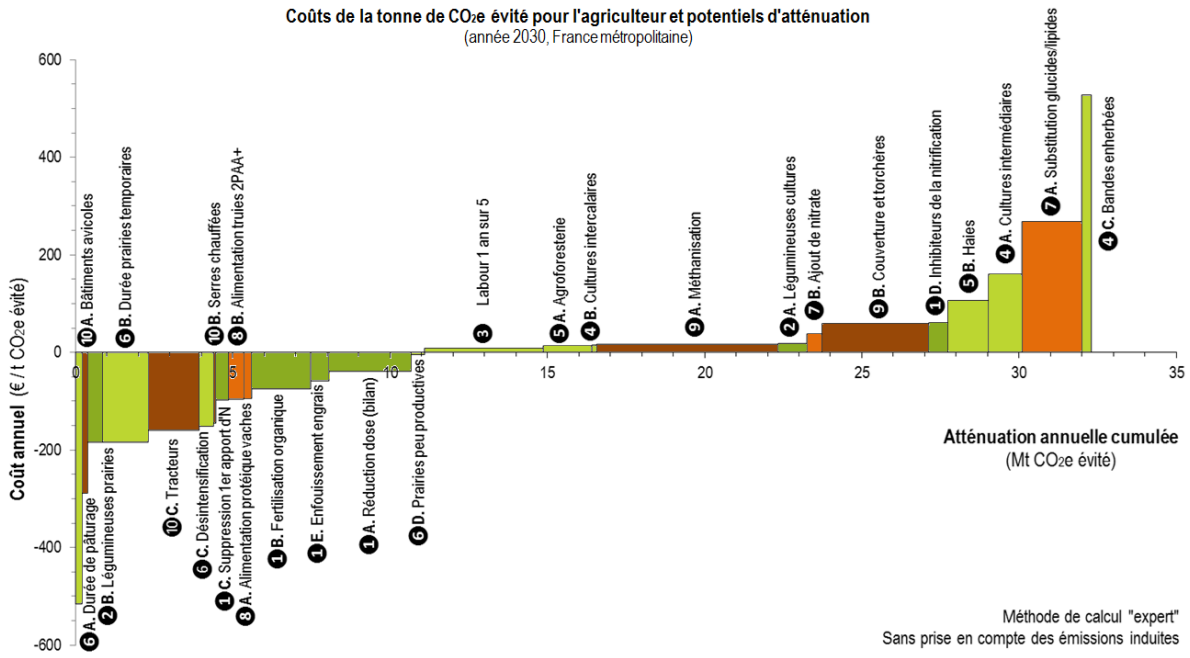

Figure 4 : Coût de la mesure en fonction de la tonne de CO2 évitée. (Etude GES. Pellerin et al., 2013).

Les freins au changement ont aussi **des dimensions sociales et économiques**, au niveau de l'organisation des filières et des politiques publiques. Des expertises récentes comme l'Etude GES (Pellerin et al., 2013) ont permis d'éclairer les lien entre dispositif/mesure et coût (Figure 4). Cependant leur mise en œuvre peut poser des difficultés à différents niveaux. **Au niveau des agriculteurs**, la plus grande complexité de gestion des systèmes utilisant moins d'intrants chimiques et le risque d'accroissement de la sensibilité à l'aléa, voire l'accroissement de la charge de travail ou le besoin en capital sont autant de freins à une évolution des systèmes de production. **Au niveau des filières**, la demande pour des produits homogènes et en quantités toujours plus importantes est aussi un frein majeur. En outre, il existe un effort de sélection très hétérogène selon les espèces, avec un progrès génétique moins rapide chez les légumineuses, un accès difficile au conseil technique et des références techniques trop peu abondantes. L'accroissement des surfaces en légumineuses dépendra aussi de l'identification de débouchés nouveaux et stables soutenus par exemple par des contractualisations pluri-annuelles. Un levier complémentaire se situe au niveau des débouchés alimentaires, valorisant par exemple les qualités nutritionnelles des graines de légumineuses. On peut aussi imaginer des innovations technologiques dans le domaine des bio-raffineries (par exemple l'extraction de protéines foliaires ou de lipides, les sucres pouvant être des matières premières pour d'autres industries). Il existe donc des difficultés à traiter au champ et en aval, liées à des productions plus hétérogènes, ou plus variables dans le temps, tant en termes de qualité que de quantité. Le couplage cultures-élevage entre exploitations d'un territoire ou entre régions engendre des freins importants liés à la complexité de gestion.

D'un point de vue économique, la certification des appareils (gestion des intrants, …) et des pratiques peut permettre une labellisation utile pour faire reconnaitre les changements réalisés. Accroitre le recyclage constitue un levier important pour valoriser les effluents d'élevage ou les ressources urbaines dont l'innocuité est à vérifier. **Au niveau des politiques publiques**, un enjeu pour l'avenir est l'évaluation et la rémunération de services autres que les services de production, le soutien tant aux pratiques vertueuses qu'à la prise de risque inhérent à un changement de système de production. Des

exemples de coordination des acteurs ont été soulignés comme des contrats de commercialisation, des certificats d'éco-épandage.

Conclusions

De l'agronomie et des systèmes d'élevage à l'agroécologie, on relèvera trois grands types de leviers pour mieux boucler les cycles biogéochimiques :

- **La biologie des organismes : communautés microbiennes, plantes et animaux** sont à mieux caractériser dans de nouveaux contextes environnementaux, avec de nouvelles pratiques agricoles et d'élevage, telles que des associations et successions culturales plus hétérogènes, permettant la disponibilité des éléments minéraux aux phases critiques et leur biotransformations sous des formes stables. Les caractéristiques d'adaptation et de nutrition sont particulièrement importantes et les interactions entre plantes et microorganismes, ou animaux et microorganismes sont à mieux explorer ; une meilleure connaissance du fonctionnement biologique des sols est indispensable ;
- **Des approches intégrées, multi-échelles et multi-compartiments, couplant les cycles biogéochimiques C-N-P** dans les plantes, les sols, les eaux, les aliments et effluents, traversant un continuum parcelle, exploitation, bassin versant et territoire, analysant les phases de couplage et découplage de ces éléments, les phases d'équilibre et de déséquilibre dans les ratios mis en jeu entre ces éléments chimiques.
- **Des approches multi-services,** un accompagnement des agriculteurs, une implication des filières et toutes les parties prenantes, une incitation et soutien des politiques publiques à l'évolution des systèmes agricoles.

Références bibliographiques

Bonaudo T., Burlamaqui Bendahan A., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. European Journal of Agronomy 57, 43-51.

Bourion V., Revellin C., Bizouard F., De Larambergue H., Aubert V., Duc G., Hénault C., 2015. Impact of pea genetic variability on the control of N2O reduction by soil-microorganisms-plant systems. 3rd Global Science Conference on Climate-Smart Agriculture, March 16-18 2015, Montpellier, France

Bourion V., Laguerre G., Depret G., Voisin A.S., Salon C., Duc G., 2007. Genetic variability in nodulation and root growth affects nitrogen fixation and accumulation in pea. Annals of Botany 100 (3), 589-598.

Dumont B., Bernues A., 2014. Agroecology for producing goods and services in sustainable animal farming systems. Animal 8 (8), 1201-1203.

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

Laguerre G., Depret G., Bourion V., Duc G., 2007. Rhizobium leguminosarum bv. viciae genotypes interact with pea plants in developmental responses of nodules, roots and shoots. New Phytologist 176 (3), 680-690.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.-P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.-H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, Inra, Direction de l'expertise de la prospective et des études (DEPE), Paris, France, 94 p.

Peyraud J.L., Taboada M., Delaby L., 2014. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review. European Journal of Agronomy 57, 31-42

Thomas M., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Tichit M., Gonzales-Garcia E., Dourmad J.Y., Dumont B., 2014. Agroecology and industrial ecology: two complementary alternatives for animal production in the 21st century. Productions Animales 27 (2), 89-99.

Wassenaar T., Queste J., Paillat J.-M., Saint Macary H., 2015. La co-construction de filières de recyclage de résidus organiques à la Réunion. Innovations Agronomiques 43, 161-175.

www.agriculteurs56.com/synagri/certification-environnementale-eco-epandage-en-machinisme-agricole

www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/en-savoir-plus-actus/96-simeos-amg

www.plage-evaluation.fr/webplage/