HAL open science

Agriculture et ressources naturelles : de quoi parlons-nous ?

Thomas Nesme, Thierry Doré, Delphine Leenhardt, Sylvain S. Pellerin

To cite this version:

Thomas Nesme, Thierry Doré, Delphine Leenhardt, Sylvain S. Pellerin. Agriculture et ressources naturelles : de quoi parlons-nous ?. Agronomie, Environnement & Sociétés, 2016, Regards agronomiques sur les relations entre agriculure et ressources naturelles, 6 (1), pp.13-23. hal-01374781

HAL Id: hal-01374781

https://agroparistech.hal.science/hal-01374781

Submitted on 1 Oct 2016

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

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

Association Française Agronomie

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.
Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.
Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45
Site Internet : http://www.agronomie.asso.fr

Objectif
AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence *Creative commons*

Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons* 2.0. 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.

Directeur de la publication
Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef
Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial
Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad
Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad
Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne
Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction
- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Valentin BEAUVAL, agriculteur
- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra
- Joël COTTART, agriculteur
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axéréal
- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne
- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction
Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales
Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement
Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément
(voir conditions à http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/)

Périodicité
Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage
Tous les numéros sont accessibles à l'adresse http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/

Soutien à la revue
- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs
Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :
http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu* [*envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques*] *et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

Avant-propos
O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

Éditorial
B. DAVIRON, T. DORÉ, J.L. FORT, M.H. JEUFFROY et T. NESME (coordonnateurs du numéro)

Etat des lieux des ressources concernées
P13- Agriculture et ressources naturelles : de quoi parlons-nous ?
T. NESME, T. DORÉ, D. LEENHARDT, S. PELLERIN
P23- Agriculture et économie : du solaire au minier… et retour ?
B. DAVIRON

Contribution de l'agriculture à la raréfaction des ressources naturelles, évolution de l'activité agricole pour réduire cet impact, et solutions agronomiques pour faire face à cette raréfaction
P35- Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace
P. VAN DIJK, C. ROSENFELDER, O. SCHEURER, A. DUPARQUE, P. MARTIN, J. SAUTER
P49- Quelle(s) agriculture(s) pour une eau de qualité ?
S. FEUILLETTE, M. BENOIT
P59- Les bordures extérieures de champs en Beauce, des espaces à valoriser : ne laissons pas la biodiversité au bord du chemin
C. LE BRIS
P65- Vers des systèmes de grande culture moins dépendants des énergies fossiles
F. ANGEVIN, C. COLNENNE-DAVID, M.H. JEUFFROY, E. PELZER, T. DORÉ
P77- Avancées et perspectives sur l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les systèmes de culture
M.P. FAUCON, E. MICHEL, H. LAMBERS, D. HOUBEN
P87- Respect et valorisation des ressources naturelles et agriculture biologique : des principes forts se déclinant dans la conception et la gestion agronomique des systèmes de production
L. FOURRIÉ, B. LECLERC, A. CADILLON
P93. Agriculture biologique et ressources naturelles : pas si simple !
P. VIAUX

Organisation de la conception des solutions
P99- Le recyclage agricole des résidus organiques : une ressource naturelle pour en préserver d'autres
T. WASSENAAR, J. QUESTE, J.M. PAILLAT
P109- Entretien avec A. Gosselin : clés de réussite pour une urbanisation équilibrée et durable préservant au mieux la ressource sol
A. GOSSELIN, T. DORÉ
P115-Regards croisés sur des démarches de protection de l'eau associant le monde agricole
F. BARATAUD, R. REAU, F. HELLEC
P127- Observatoire et tableau de bord pour un pilotage dynamique des pertes de nitrate dans une aire d'alimentation de captage
L. PAVARANO, L. PROST, R. REAU
P135- Biodiversité à l'échelle du paysage : plan d'aménagement dans l'AOC viticole Saumur-Champigny
G. PAIN, M. VAN HELDEN, J. PITHON

Notes de lecture
P145- Nature à vendre – Virginie Maris
T. DORÉ
P147- Concevoir l'écosystème, un nouveau défi pour les agronomes – Elsa Berthet
T. DORÉ
P149- Agriculture et cycles biogéochimiques globaux : analyse des transformations des cycles de l'azote et du phosphore à des échelles spatiales larges, du territoire à la planète – Thomas Nesme
T. DORÉ

Annexe
P151- Appel à contribution du numéro

Article

Agriculture et ressources naturelles : de quoi parlons-nous ?

A typology of natural resources and agriculture interaction

Thomas NESME[1,*] - Thierry DORÉ[2]
Delphine LEENHARDT[3] - Sylvain PELLERIN[4]

[1]*Agronome - Bordeaux Sciences Agro - UMR ISPA - CS 40201 33175 Gradignan Cedex*
[*]*Auteur correspondant - Courriel : thomas.nesme@agro-bordeaux.fr*
[2]*UMR Agronomie - Inra/AgroParisTech - Université Paris-Saclay - 78850, Thiverval-Grignon*
[3]*Agronome - INRA - UMR AGIR - CS 52627 - 31326 Castanet Tolosan Cedex*
[4]*Agronome - INRA - UMR ISPA - CS 20032 - 33882 Villenave d'Ornon Cedex*

Résumé

L'agriculture entretient des relations complexes avec les ressources naturelles, complexité due à la diversité des ressources qu'elle mobilise et à la diversité des modalités par lesquelles elle les utilise. Cette complexité est de nature à brouiller l'analyse des relations entre agriculture et gestion des ressources naturelles et à présenter un obstacle à la mise au point de systèmes agricoles protégeant ces ressources. Dans cet article, nous essayons de clarifier ce sujet en explorant la diversité des ressources qui peuvent être mobilisées ou impactées lors des processus de production agricole. En particulier, nous proposons une typologie en quatre classes des ressources naturelles selon que celles-ci sont renouvelables, recyclables ou dissipées lors des processus de production agricoles. Nous utilisons cette typologie pour mettre en évidence la diversité des leviers agronomiques et des niveaux d'organisation qu'il convient d'activer pour mieux protéger les ressources naturelles.

Mots-clés

Ressources naturelles, typologie, recyclage, services écosystémiques.

Abstract

The relationships between agriculture and natural resources are complex. This is due to both the diversity of natural resources used by agriculture and the diversity of the ways agriculture uses these resources. Such complex relationship is an obstacle to the design of environmental-friendly farming systems. The aim of this article is to disentangle such complex relationships. To do so, we propose a four-class typology organised around the nature of natural resources (renewable, recyclable or dispersable). We use this typology to show the range of agronomic leverages and corresponding organisation levels that can be activated to better conserve these resources.

Introduction

L'agriculture entretient des relations complexes avec les ressources naturelles. Elle est une activité productrice, mais aussi consommatrice de ressources. La production de ressources par l'agriculture concerne des biens utilisés par d'autres secteurs agricoles (tels que l'élevage) ou par des secteurs non-agricoles. Par exemple, les systèmes de culture à base de légumineuses produisent une biomasse riche en azote qui peut être utilisée pour l'alimentation des animaux d'élevage. De même, les systèmes de culture peuvent fournir une biomasse servant à la production de matériaux bio-sourcés (bioplastiques, biopolymères) par l'industrie chimique ou à la production de biogaz. L'agriculture contribue aussi à la "production" d'une certaine biodiversité (planifiée, par le choix des espèces et variétés, ou naturelle, par le cortège des espèces qui accompagnent les espèces cultivées) qui peut rendre des services dans des écosystèmes non agricoles. En ce qui concerne les ressources consommées par l'agriculture, celles-ci le sont durant la phase de production agricole *stricto sensu* mais aussi en amont et en aval de l'acte de production, c'est-à-dire tout au long des chaines alimentaires humaines dans lesquelles s'inscrit l'agriculture. Par exemple, si la production agricole consomme de l'énergie fossile sous forme de carburants nécessaires aux machines ou au chauffage des serres et bâtiments, cette énergie fossile est également consommée en amont, lors de la fabrication des engrais azotés par exemple, ou en aval, lors du transport, du stockage, de la transformation, de la commercialisation et de la consommation des produits agricoles.
Les dernières décennies ont fait apparaître des controverses vives quant au rôle de l'agriculture dans l'épuisement des ressources naturelles (Foley *et al.*,, 2011 ; Garnett *et al.*,, 2013). N'importe quel examen de la production cinématographique, littéraire ou journalistique depuis cinq à dix ans montre que l'agriculture est souvent mise en cause avec véhémence dans l'épuisement de ces ressources[1]. La complexité des relations agriculture-ressources naturelles évoquée ci-dessus nous oblige cependant à clarifier les termes du débat et à poser la question avec plus de précision.
Nous nous proposons ici (i) d'explorer dans les grandes lignes les ressources naturelles qui peuvent être impactées par l'agriculture et (ii) d'élaborer une typologie de ces ressources selon la manière dont elles sont impactées. Notre propos sera centré sur les ressources naturelles que l'agriculture consomme à l'échelle mondiale ou locale[2]. Bien que les pratiques de collecte, stockage, transformation, commercialisation et consommation des produits agricoles consomment également des ressources naturelles et que ces pratiques sont fortement connectées aux pratiques agricoles dans des « systèmes alimentaires », nous restreindrons le sujet de cet article aux seules pratiques agricoles pour plus de clarté. Nous définirons une ressource naturelle comme une ressource matérielle prélevée dans l'environnement, en vue d'une finalité (le plus souvent productive).

[1] Voir par exemple le film "Solutions locales pour un désordre global" de Coline Serreau (2010) ou le livre "Bidoche : l'industrie de la viande menace le monde" de Fabrice Nicolino (2009).
[2] C'est-à-dire que nous mettrons de côté dans cet article les ressources naturelles que l'agriculture contribue à produire.

La revue de l'association française d'agronomie //volume 6 numéro 1 - juin 2016

De quelles ressources naturelles parlons-nous ?

Une grande diversité de ressources naturelles mobilisées ou impactées

L'agriculture consomme des ressources naturelles de différentes façons : ces ressources peuvent être mobilisées directement dans le processus de production, comme les carburants des machines, l'eau d'irrigation ou les sols agricoles, mais elles peuvent également être mobilisées de façon indirecte par l'agriculture, par exemple lors de la fabrication des intrants. Il en résulte que la diversité des ressources naturelles mobilisées est large. Il peut s'agir des énergies fossiles, des eaux de surface ou souterraines, des roches phosphatées, des sols, de la biodiversité fonctionnelle, etc. Nous proposons ci-dessous un panorama forcément non exhaustif des principales ressources naturelles mobilisées par l'agriculture.

La première de ces ressources naturelles concerne les sols, support indispensable de la production végétale (même si des systèmes de production hors-sol existent, qui restent cependant marginaux). A l'échelle mondiale, on estime que l'agriculture occupe 38% de la surface terrestre (en incluant les prairies), ce qui la place clairement comme premier gestionnaire de l'espace, d'autant plus qu'une grande partie des surfaces restantes est occupée par des biomes peu anthropisés tels que des déserts, montagnes et toundras (Foley *et al.*, 2011). L'occupation de ces sols par l'agriculture conduit à une forme d'appropriation de la biomasse terrestre par les activités humaines via la récolte de cette biomasse ou via les changements d'usage des terres qu'induit la production agricole : cette appropriation est désormais évaluée à hauteur de 24% de la productivité potentielle des écosystèmes terrestres (Haberl *et al.*, 2007). En complément de cette appropriation, l'activité agricole peut conduire à des dégradations des sols via les phénomènes de pollution, compaction ou érosion.

Une seconde ressource largement utilisée désormais par l'agriculture des pays industrialisés concerne l'énergie fossile. Cette consommation d'énergie se fait typiquement de façon directe (sous forme de carburants pour les machines agricoles ou de combustible pour les serres et bâtiments) ou de façon indirecte (lors de l'élaboration des intrants agricoles). Par exemple, on estime ainsi que 2% de toute la consommation énergétique mondiale (ce qui est beaucoup !) est imputable à la fabrication des engrais minéraux azotés, pour un marché total de 102 milliards de dollars US en 2009 (Service, 2014). Bien que cette énergie fossile puisse provenir de différentes sources (pétrole, gaz naturel, charbon) ayant des enjeux de raréfaction différenciés, il est désormais admis que l'agriculture est un secteur significativement consommateur d'énergie fossile et qui contribue à sa raréfaction.

L'eau d'irrigation est également une ressource largement mobilisée en agriculture, au moins dans les régions où le déficit hydrique estival est marqué. La responsabilité de l'agriculture à ce sujet donne souvent lieu à des controverses sociétales fortes, dont le cas du barrage de Sivens (Tarn) a donné un nouvel exemple. En effet, le prélèvement dans le milieu et la consommation sous forme d'irrigation conduisent à des situations dans lesquelles la demande agricole en eau peut être bien supérieure à l'offre ou au rythme de renouvellement de celle-ci. Il en est ainsi des eaux de surfaces pour lesquelles les prélèvements en rivières et retenues collinaires pour l'irrigation sont supérieurs à l'offre disponible dans une grande partie de la France (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces situations ont conduit les réglementations successives à délimiter des Zones de Répartition des Eaux dans lesquelles l'offre est de manière chronique inférieure à la demande, puis à y limiter les volumes « prélevables » dans le milieu afin de respecter des objectifs de débits à l'étiage.

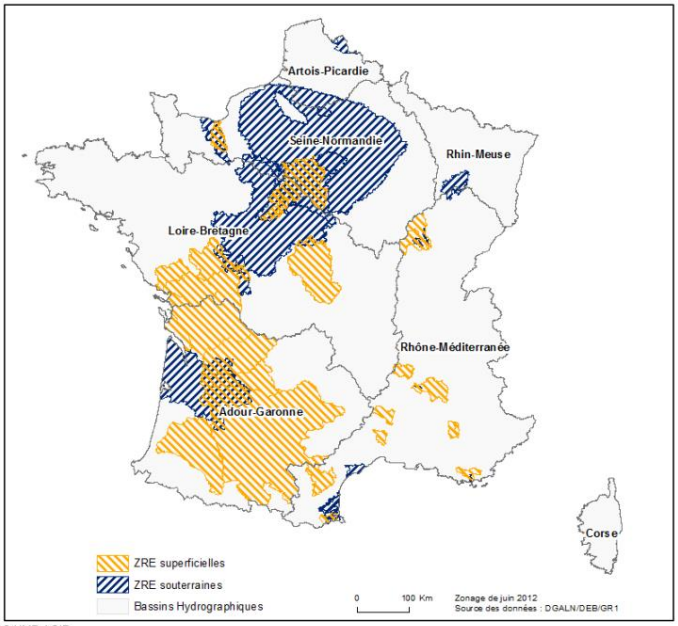

Figure 1 : Cartographie des Zones de Répartition des Eaux (ZRE) à déficit hydrique chronique (offre<besoins).
Figure 1: Map of regions with chronical water shortage (supply<demand)

De même, les prélèvements d'eau pour l'irrigation au sein des nappes profondes peuvent conduire à une dégradation rapide de celles-ci, c'est-à-dire que le rythme de prélèvement devient plus rapide que le rythme de réapprovisionnement des nappes, alors même que ces nappes contribuent à hauteur de 50% aux prélèvements d'eau agricoles mondiaux. Le cas le plus célèbre de cette dégradation des nappes profondes est celui de la nappe de Californie qui, en 2013, avait perdu l'équivalent de 160mm par rapport à sa hauteur sur la période 2005-2010 (Famiglietti, 2014). Ce cas n'est malheureusement pas isolé puisque de nombreux aquifères dans le monde subissent la même dégradation, qui se trouve accélérée par le changement climatique (Figure 2 et Tableau 1).

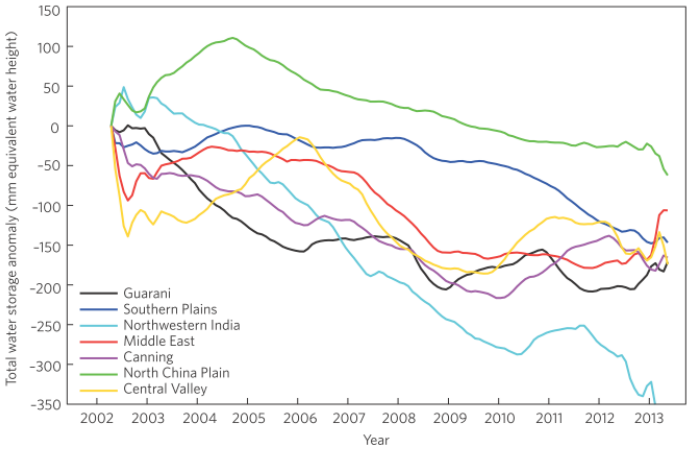

Figure 2 : Anomalie de profondeur des principaux aquifères souterrains dans le monde. Source : Famiglietti et al., 2014
Figure 2: Depth anomaly of most belowground aquifers.

Source: Farmiglietti et al., 2014

Aquifère	Pays	Taux de diminution estimé		Période
		En mm/an	En km³/an	
Nord-Ouest du Sahara	Algérie, Libye, Tunisie	2.8	2.7	2003-2013
Vallée centrale de Californie	Etats Unis d'Amérique	20.4	3.1	2003-2010
Grandes Plaines	Etats Unis d'Amérique	27.6	12.5	2003-2013
Guarani	Argentine, Brésil, Paraguay, Uruguay	0.6	1.0	2003-2009
Nord-Est du Moyen-Orient	Iran, Irak, Syrie, Turquie	17.3	13.0	2003-2009
Arabique	Irak, Jordanie, Oman, Qatar, Arabie Saoudite, Emirats Arabes Unis, Yémen	9.1	15.5	2003-2013
Nord-Ouest de l'Inde	Inde, Pakistan	40.0	17.7	2002-2008
Plaines du nord de la Chine	Chine	22.0	8.3	2003-2010
Bassin du Canning	Australie	9.4	3.6	2003-2013

Tableau 1 : Taux annuels de diminution des principaux aquifères mondiaux des régions arides et semi-arides des latitudes moyennes. Source : Famiglietti et al., 2014
Table 1: Annual rate of depletion of major underground aquifers in arid and semi-arid world regions. Source: Famiglietti et al., 2014

Un dernier exemple de consommation de ressources naturelles par l'agriculture concerne le cas des roches phosphatées, utilisées pour la fabrication des engrais minéraux riches en phosphore (P). Bien que des controverses existent sur le rythme de disparition de ces roches phosphatées, la plupart des auteurs s'accordent pour dire qu'un pic d'extraction de ces réserves devrait être atteint vers 2050 et que l'ensemble des ressources disponibles devrait être consommé d'ici à 2150 (Cordell *et al.,* 2009 ; Peñuelas *et al.,* 2013 ; Van Vuuren *et al.,* 2010). La disparition de ces réserves pourrait alors conduire à un choc pour l'agriculture mondiale, en particulier pour les régions entièrement dépourvues de ressources en roches phosphatées (comme c'est le cas dans l'Union Européenne, mais aussi dans d'autres grands pays agricoles comme l'Inde ou le Brésil) et pour les régions n'ayant pas la solvabilité nécessaire pour acquérir des engrais minéraux devenus onéreux.
Les quelques exemples évoqués ci-dessus montrent que l'agriculture mobilise et impacte une grande diversité de ressources naturelles. Cette diversité souligne l'ampleur et la difficulté de la tâche qui consiste à réduire ces impacts de l'agriculture. Elle suggère également que différentes solutions pourront et devront être explorées afin de réduire les impacts de l'agriculture, sur lesquelles nous reviendrons en dernière partie.

Des ressources naturelles qui le plus souvent se raréfient

L'examen ci-dessus des principales ressources naturelles mobilisées par l'agriculture montre par ailleurs que celles-ci se raréfient dans la plupart des cas. Sur le long terme, les causes de cette raréfaction sont principalement au nombre de trois. Tout d'abord, certaines ressources voient leur disponibilité diminuer parce que le rythme de leur consommation est supérieur à celui de leur renouvellement. Ce cas concerne évidemment les ressources fossiles, telles que les énergies fossiles ou les roches phosphatées, qui ne se reconstituent que sur des pas de temps géologiques incompatibles avec les pas de temps de l'activité humaine contemporaine. C'est également le cas des eaux issus des aquifères profonds, reconstitués sur des décennies voire des siècles. Ensuite, les ressources naturelles mobilisables peuvent également se raréfier du fait de leur contamination, d'origine naturelle ou anthropique. Ce cas concerne les roches phosphatées dont les gisements peuvent être contaminés en uranium ou en cadmium, mais aussi des eaux de surface ou profondes dont les réserves seraient contaminées en pesticides et rendues impropres pour l'irrigation. Enfin, la disponibilité en ressources naturelles peut diminuer car nous savons que le respect des limites planétaires[3] conduit à ce que ces ressources ne soient plus utilisées si nous souhaitons maintenir la terre sur une trajectoire durable (Steffen *et al.,* 2015). Ce cas concerne spécifiquement les énergies fossiles puisque nous savons désormais avec suffisamment de certitude que 33 % des réserves mondiales en pétrole, 50% des réserves en gaz naturel et 80% des réserves en charbon doivent être laissées sous terre pour maintenir l'augmentation de la température de la biosphère en dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle (McGlade et Ekins, 2015). A plus fine échelle, ce cas concerne aussi les limites fixées aux écosystèmes afin de maintenir leur viabilité. Il en est ainsi des débits objectifs d'étiage des rivières qui permettent de maintenir le bon état des écosystèmes aquatiques. Dans une certaine mesure au moins, la connaissance de ces limites planétaires a conduit à élaborer un jeu de normes et de réglementations censées garantir leur respect.
Au-delà de la raréfaction de long terme des ressources naturelles qui vient d'être évoquée, on peut également s'attendre à ce que la plupart de ces ressources voient leur disponibilité physique et leur accessibilité économique varier à court terme. Cette variabilité de court terme peut résulter de différents facteurs. En premier lieu les variations climatiques - dont on peut s'attendre à ce qu'elles deviennent plus fortes et plus fréquentes à l'avenir - peuvent engendrer une variabilité forte dans le temps comme dans l'espace de

[3] On entend par "limites planétaires" un ensemble de seuils définis par la communauté scientifique internationale au sujet de plusieurs variables écologiques majeures (telles que la concentration en CO_2 dans l'atmosphère, le rythme de disparition des espèces vivantes, la quantité d'azote réactif présent dans la biosphère, etc.) au-delà desquels le fonctionnement général de la biosphère pourrait être très largement impacté et engendrerait des coûts majeurs d'adaptation pour l'espèce humaine.

la disponibilité des ressources en eau mais aussi en biomasse végétale.
Les variations de conjoncture économique peuvent également modifier fortement l'accessibilité des ressources utilisées en agriculture. Ce cas a été observé en 2008 à la suite de l'envolée du cours du pétrole, qui a conduit à une multiplication par huit du cours des engrais phosphatés par rapport à l'année 2006 puis à une relaxation de ce prix à partir de 2010 (*World Bank Commodity Prices*). Par ailleurs, les innovations technologiques (et leur acceptation sociétale) peuvent conduire à des changements importants dans l'accessibilité de certaines ressources naturelles. Il en est ainsi du développement de la fracturation hydraulique des sols qui a rendu l'accès possible à d'importants gisements de gaz naturel, avec un développement rapide de l'exploitation des gaz de schiste outre-Atlantique. Cette exploitation a, en retour, initié une baisse forte des cours du pétrole et du gaz naturel depuis 2012, eux-mêmes de nature à stimuler la demande en fertilisants minéraux azotés. Enfin, la disponibilité et l'accessibilité des ressources naturelles peuvent être sujettes à des changements de situation géopolitique. Le cas exemplaire à ce sujet est celui des roches phosphatées dont les réserves mondiales sont contrôlées à plus de 85% par seulement trois pays : le Maroc, suivi de loin derrière par les USA et la Chine (Figure 3). Toute tension géopolitique avec ces pays peut être de nature à faire basculer la disponibilité en roche phosphatées à l'échelle mondiale.

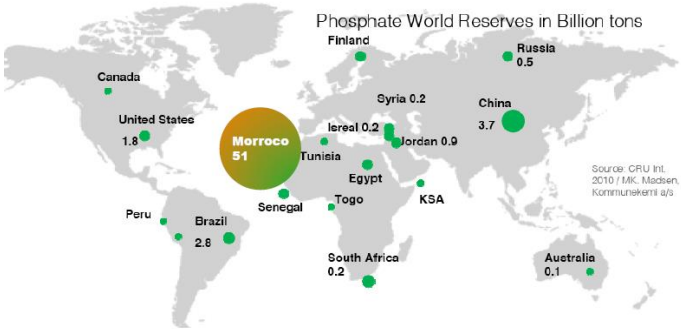

Figure 3 : Réserves mondiales en roches phosphatées (en Gt).
Source : US Geological Survey, 2010.
Figure 3: Global reserves of rock phosphate (in Gt).
Source: US Geological Survey, 2010

Comment l'agriculture modifie-t-elle la disponibilité des ressources naturelles ?

Les exemples évoqués ci-dessus ont montré que l'agriculture pouvait impacter l'état et la disponibilité de nombreuses ressources naturelles. D'importants progrès ont été réalisés au sujet de la compréhension de ces impacts grâce au développement de bases de données conséquentes et d'outils de type empreinte environnementale et Analyse de Cycle de Vie appliqués à l'agriculture (Hellweg et Milà i Canals, 2014 ; Yang et Suh, 2015 ; Viglizzo *et al.*, 2010). Sans entrer dans trop de détail méthodologique, cette compréhension des relations entre agriculture et ressources naturelles est rendue délicate par le fait que les impacts de l'agriculture sur les ressources sont fortement "contexte-dépendants", c'est-à-dire influencés par les conditions de sol et de climat mais aussi par la diversité des pratiques agricoles mises en jeu. Au-delà de ces difficultés, il apparait que les impacts de l'agriculture sur les ressources naturelles peuvent se réaliser de quatre manières différentes.
Premièrement et de façon assez classique, l'agriculture peut consommer des ressources naturelles, entrainant ainsi leur raréfaction localement ou de façon plus lointaine dans l'espace. Un exemple paradigmatique est celui des roches phosphatées, utilisées principalement pour la fabrication d'engrais minéraux. Les pratiques de fertilisation minérale phosphatée stimulent la demande en roches phosphatées, ce qui conduit *in fine* à une exploitation accrue de ces ressources minières non renouvelables dans les pays qui disposent de telles réserves.
En second lieu, les pratiques agricoles peuvent conduire à des changements d'affectation des ressources naturelles. Par exemple, les pratiques agricoles peuvent conduire à des changements directs de l'usage des sols en mettant en culture des zones humides, des forêts, etc. Mais les pratiques agricoles peuvent également conduire à des changements indirects de l'usage des sols. Ainsi, l'emploi croissant du soja dans les rations des élevages européens, qui a stimulé la production de soja sud-américain sur des sols anciennement forestiers (Smaling *et al.*, 2008 ; de Visser *et al.*, 2014), montre qu'un changement des pratiques d'élevage a pour conséquence une diminution des ressources forestières. A l'échelle mondiale, on estime que ces changements d'usage des sols sont majeurs puisqu'ils représentent 40% de l'appropriation de la productivité primaire des écosystèmes par les pratiques humaines (Haberl *et al.*, 2007). Il en résulte des conséquences profondes pour le fonctionnement hydrique, thermique et biologique des écosystèmes (Foley *et al.*, 2005) mais aussi pour les sociétés humaines ayant pour habitat les espaces potentiellement modifiés par l'agriculture (Thibault, 2015).
Troisièmement, les pratiques agricoles peuvent conduire à une modification de la circulation naturelle des ressources dans les écosystèmes. Il en est ainsi des barrages posés sur les cours d'eau, destinés à fournir des ressources pour l'irrigation. En fragmentant la continuité des cours d'eau ou en modifiant leur débit, ces barrages ont des conséquences importantes pour le fonctionnement biologique, érosif et sédimentaire des fleuves et rivières. Bien que la constitution de réserves pour l'irrigation ne constitue qu'une des finalités des barrages hydrauliques, on estime qu'aujourd'hui 48% des rivières mondiales sont affectées par la fragmentation ou la modification de leurs débits. C'est particulièrement vrai en Europe de l'Ouest, en Amérique du Nord et en Asie du Sud (Figure 4), ce qui entraîne des conséquences majeures pour les écosystèmes aquatiques terrestres et leur environnement latéral (Grill *et al.*, 2015).

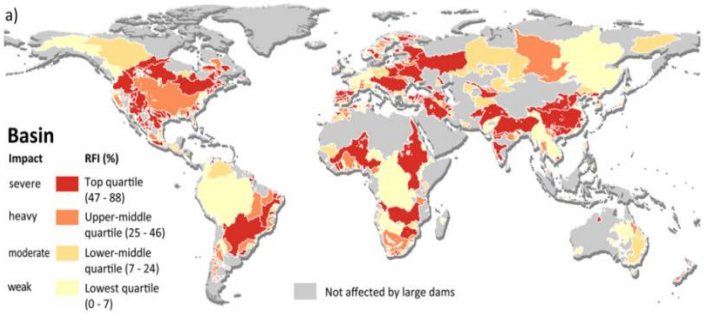

Figure 4 : Classification des bassins mondiaux selon l'indice de fragmentation de leurs rivières. Source : Grill et al., 2015.
Figure 4: Typology of global basins according to their river fragmentation index. Source: Grill et al., 2015

Enfin et quatrièmement, les pratiques agricoles sont responsables de pollutions des ressources naturelles, rendant celles-ci non-utilisables pour l'agriculture ou pour d'autres usages sociétaux. Par exemple les activités conchylicoles, typiquement situées à l'exutoire des bassins versants, sont fortement dépendantes de la qualité de l'eau à l'exutoire, et peuvent être compromises par des activités agricoles situées en amont qui génèrent des flux de polluants (nitrate, phosphates, pesticides) vers les cours d'eau. De même, cette pollution des cours d'eau réduit fortement la valeur d'usage des eaux pour l'alimentation humaine - jusqu'à les rendre impropre à la consommation humaine dans certaines régions (Figure 5) - et engendre des coûts importants de dépollution ou d'approvisionnement en eau potable.

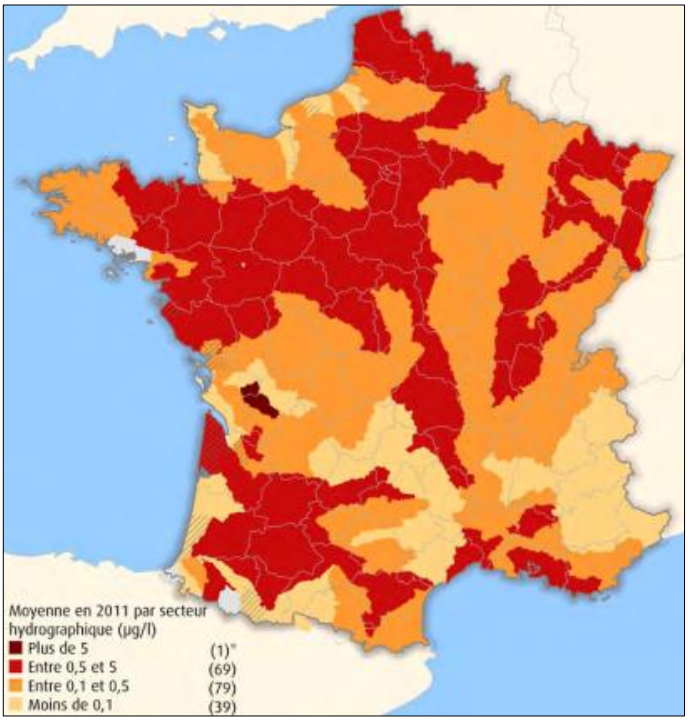

Figure 5 : Concentrations en pesticides dans les cours d'eau par secteur hydrographique en France métropolitaine en 2011 (les eaux sont déclarées non potables si la concentration de chacun des pesticides analysé est supérieure à 0,1 µg.l^{-1} ou si le total des concentrations tous pesticides confondus est supérieur à 0,5 µg.l^{-1}).
Source : Service de l'Observation et de la Statistique du Ministère en charge de l'écologie.
Figure 5: Pesticide concentration in rivers by hydrographic sectors in France in 2011. Water are not drinkable if individual pesticide concentration is greater than 0,1 µg.l^{-1} or if total pesticide concentration is greater than 0,5 µg.l^{-1}.
Source: French Ministry of Ecology

Les éléments évoqués ci-dessus montrent que la diversité des modalités d'impact de l'agriculture sur les ressources naturelles est très large. Il convient toutefois de conserver à l'esprit que la responsabilité de l'agriculture dans la dégradation de l'état ou la raréfaction d'une ressource donnée peut être très variable. Ainsi, certaines ressources peuvent être impactées principalement par l'agriculture : c'est le cas des roches phosphatées, utilisées à 90% en agriculture, comme engrais ou comme complément minéral à l'alimentation des animaux. A l'inverse, certaines ressources peuvent être impactées par de multiples secteurs économiques, dont l'agriculture n'est qu'un parmi d'autres : c'est le cas des énergies fossiles, utilisées en agriculture mais aussi par de très nombreuses activités économiques.
Cette diversité de modalités d'impact et de ressources naturelles concernées est de nature à brouiller l'analyse des relations entre agriculture et gestion des ressources naturelles. Elle peut également constituer un obstacle à la mise au point de systèmes agricoles protégeant ces ressources. Afin de lever cet obstacle, nous proposons de procéder par classification, en distinguant différents types de ressources naturelles et en identifiant les leviers existant en agriculture pour conserver celles-ci. Pour chaque type, nous allons également essayer d'identifier les niveaux d'organisation et échelles les plus pertinentes pour mettre en place des mesures de conservation de ces ressources.

Une typologie des ressources naturelles utilisées en agriculture

La typologie que nous proposons ici comporte quatre classes. Elle se fonde sur la nature des ressources naturelles selon que celles-ci sont renouvelables, recyclables ou dissipées lors des processus de production agricoles.

Cas 1 : les ressources dissipées lors du processus de production, non-renouvelables

La première classe de la typologie porte sur les ressources non-renouvelables à l'échelle humaine et qui peuvent être dissipées de façon irréversible lors des processus de production agricole. La ressource type de cette classe concerne les énergies fossiles - pétrole et gaz naturel principalement - mais les eaux extraites d'aquifères profonds ou les sols fortement érodés peuvent également rentrer dans cette classe au vu de leurs temps de reconstitution très longs (souvent plusieurs siècles).
La protection de ces ressources naturelles consiste simplement à limiter leur usage en agriculture (ce qui peut être compliqué ou douloureux !), afin de prolonger la durée de vie de leurs stocks. En général, la réduction de l'usage de ces ressources nécessite un appel accru aux services rendus par les écosystèmes, le plus souvent à l'échelle du système de culture. Par exemple, en grandes cultures, la réduction de la consommation directe d'énergie fossile nécessite de réduire la fréquence du labour, technique reconnue comme très énergivore. Le contrôle de la structure du sol nécessite alors un recours accru au service de régénération de la structure qu'opèrent les vers de terre anéciques : des résultats convergeant montrent que, après une compaction sévère, la porosité structurale, la continuité des macropores et l'infiltration de l'eau dans le sol peuvent retrouver au bout de 24 mois et sous l'effet de l'activité des vers de terre, des niveaux observés dans les sols non-compactés (Capowiez *et al.*, 2012).

De même, la réduction de la consommation indirecte d'énergie fossile en grande culture nécessite de réduire la consommation d'engrais azotés minéraux dont on a montré plus haut le coût énergétique. Ce moindre recours aux engrais minéraux azotés peut être réalisé grâce à l'insertion plus fréquente de légumineuses fourragères (ou éventuellement à graines) dans les systèmes de culture, sous forme de culture pure, de culture associée ou de couvert de service (voir l'article de Angevin *et al.* dans ce numéro). Là encore, les références techniques s'accumulent pour montrer que les couverts de légumineuses peuvent fournir, après leur destruction, des quantités importantes d'azote (de l'ordre de plusieurs dizaines de kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$) aux cultures suivantes (Amossé *et al.*, 2014). On sait toutefois que la diversification des systèmes de culture via l'introduction de légumineuses se heurte à des freins de multiples natures (tels que le fonctionnement des bassins de collecte des coopératives, la disponibilité de semences adaptées à différents contextes et objectifs, la disponibilité d'un conseil technique pertinent, etc.). Une meilleure valorisation du service de fixation de l'azote atmosphérique dans les sols rendu par les légumineuses nécessite donc d'identifier et d'agir sur ces leviers le plus souvent situés à des niveaux d'organisation supérieurs à l'exploitation agricole (Meynard et Messéan, 2014).

Cas 2 : les ressources dissipées dans le processus de production mais renouvelables

La deuxième classe de la typologie désigne les ressources renouvelables sur des pas de temps relativement courts (quelques années) mais dont l'usage en agriculture aboutit à leur dissipation. Les ressources pouvant rentrer dans ce cas sont les eaux de surface ou souterraines, dont les stocks peuvent se renouveler en quelques mois ou années, voire les sols moyennement érodés ou la biomasse agricole et forestière, dont la régénération peut se faire en quelques années ou décennies.

La protection de ces ressources consiste principalement à limiter leur usage afin de respecter leurs processus et délais de reconstitution. Il convient alors de disposer d'une part d'une estimation fine de la vitesse de reconstitution de ces ressources, et d'autre part de procédures de coordination permettant d'en contrôler la demande. Par exemple, en France la protection des ressources en eau superficielle consiste à identifier des Zones de Répartition des Eaux dans lesquelles on observe des déficits hydriques chroniques (voir Erreur ! Source du renvoi introuvable.) puis à définir des quotas prélevables pour l'irrigation au sein de chaque bassin (Figure 6). La définition de ces quotas permet alors de quantifier l'effort de réduction du volume prélevé pour l'irrigation par rapport à la situation actuelle. L'estimation de cette réduction devient enfin un guide pertinent pour la mise au point de systèmes de culture économes en eau, en jouant sur les différents leviers agronomiques connus tels que le choix des assolements, variétés, dates de semis et récolte, modalités de travail du sol, etc.

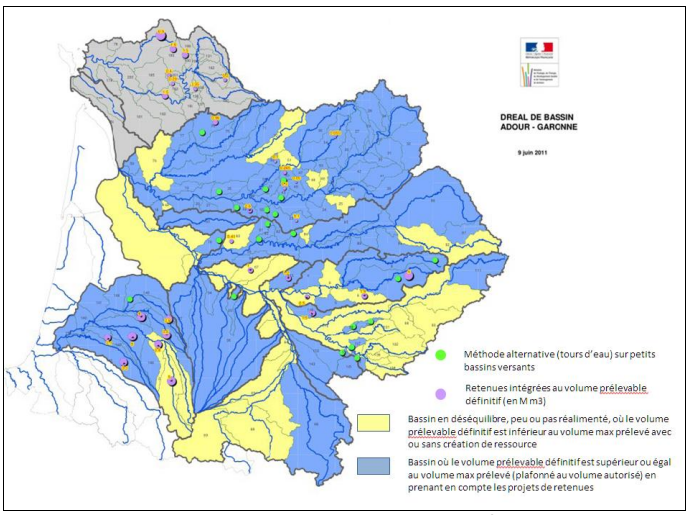

Figure 6 : Typologie des bassins versants du bassin Adour-Garonne fondée sur l'écart entre les volumes attribués prélevables pour l'irrigation et les volumes maximum prélevés par le passé. Source : DREAL de bassin Adour-Garonne

Figure 6: Catchment classification according to the discrepancy between allowed amounts of water to be withdrawn for irrigation and maximum amounts of water withdrawn in past years in the French Adour-Garonne basin. Source: French Ministry of Ecology, sub-section for Adour-Garonne basin.

Plus largement, les chercheurs qui se sont intéressés à la gouvernance des biens communs que constituent les ressources partagées, dissipées lors des processus de production mais renouvelables à moyen terme, ont montré qu'il existait des dispositifs locaux vertueux d'auto-organisation des acteurs qui permettent de respecter les délais de reconstitution de ces ressources (Ostrom, 2010). En explorant de façon empirique différentes situations dans lesquelles de tels dispositifs existent et fonctionnent - parfois depuis des siècles - en particulier au sujet de la nappe aquifère souterraine de Californie ou de la gestion des canaux d'irrigation dans la province de Valence en Espagne, ces auteurs ont montré que des règles de gouvernance fortes devaient être adoptées par les acteurs. Ces règles portent généralement sur les modalités de contrôle des comportements des acteurs, de sanction des comportements non-collaboratifs, de partage des coûts de surveillance et de capacité à s'auto-organiser. Comprendre le fonctionnement de ces dispositifs d'auto-organisation, et les modalités de gouvernance qui leur sont liées, devient un impératif pour les agronomes en charge de la protection de ce type de ressources naturelles. Un résultat majeur qui en ressort est que les leviers permettant de protéger ces ressources se situent largement à l'échelle du bassin-versant ou du territoire et impliquent fortement l'action collective.

Cas 3 : les ressources dissipées lors du processus de production mais donnant lieu à un produit recyclable

La troisième classe de la typologie porte sur les ressources qui sont dissipées lors du processus de production agricole mais qui donnent lieu à un produit - ou sous-produit - qui peut être ensuite recyclé comme ressource pour d'autres processus de production. Les ressources entrant dans cette catégorie sont les ressources géologiques fossiles telles que les roches phosphatées ou les ressources produites par la production végétale telles que l'azote fixé par les légumineuses. En effet, lorsqu'elles sont utilisées comme fertilisants des cultures, les roches phosphatées sont dissipées et disparaissent en tant que telles. Elles donnent cependant lieu à des produits végétaux riches en phosphore qui peu-

vent être ensuite utilisés dans la chaine alimentaire et/ou recyclés au sol sous forme de résidus de culture ou d'effluents d'élevage. Il en est de même pour la biomasse des légumineuses, riche en azote, qui va être dissipée lors de sa consommation par les animaux d'élevage mais qui donne lieu à la production d'effluents d'élevage qui peuvent être recyclés sur les sols agricoles. Dans une moindre mesure, cette classe peut également englober des ressources en biomasse qui, lorsqu'elles sont utilisées dans des méthaniseurs, donnent lieu à un sous-produit sous forme de chaleur valorisable pour différents usage.

La protection de telles ressources en agriculture consiste fondamentalement à valoriser les processus de recyclage, qu'ils aient lieu au sein des exploitations agricoles ou entre exploitations agricoles au sein des territoires. Une condition *sine qua non* de l'existence de boucles de recyclage reste cependant la complémentarité entre des ateliers de production agricole qui offrent *versus* qui demandent des produits à recycler. Par exemple, des travaux récents ont montré que le recyclage du phosphore entre exploitations au sein de petites régions agricoles françaises est facilité par la complémentarité des productions agricoles entre exploitations (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En comparant trois petites régions caractérisées respectivement par une dominante de grandes cultures, une diversité de productions et une dominante de productions animales, les auteurs ont montré que c'est dans la région diversifiée que le recyclage du phosphore atteint 20% et que plus de 50% du phosphore qui rentre dans les exploitations agricoles provient de sources situées dans la même petite région (Nowak *et al.,* 2015). A ce sujet, l'émergence de grands bassins de production agricole fortement spécialisés et ségrégés à l'échelle mondiale constitue sans nul doute un obstacle important au recyclage des telles ressources.

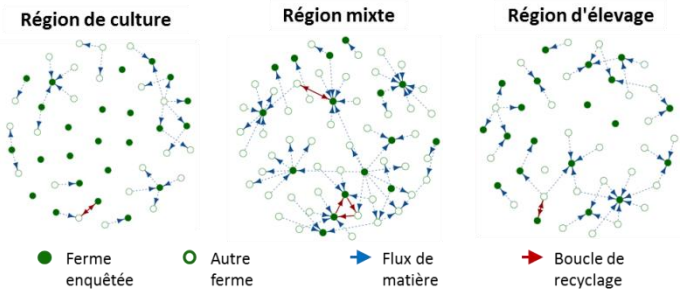

Figure 7 : Flux de matières entre exploitations agricoles au sein de trois petites régions agricoles françaises (Lomagne gersoise : région de culture, Ribéracois : région mixte, et Monts du Pilat : région d'élevage). Chacun des ronds représente une exploitation agricole dans la petite région (les ronds fermés représentent les exploitations enquêtées tandis que les ronds ouverts représentent des exploitations qui n'ont pas pu être enquêtées mais pour lesquelles des données sur le fonctionnement des exploitations étaient disponibles). Les flux de matières entre exploitations sont représentés par des flèches en pointillés bleu tandis que les boucles de recyclage sont représentées par des flèches en rouge.
Source : Nowak et al., (2015)
Figure 7: Material flows among farms within three agricultural French districts (Lomagne: arable district, Ribéracois: mixed district, Pilat; livestock district). Each circle represents one farm (full circle: surveyed farm, empty circle: non-surveyed farm). Material flows are represented by blue broken lines while recycling loops are represented by red arrows.
Source: Nowak et al., 2015.

Cas 4 : les ressources non dissipées lors des processus de production

La dernière classe de la typologie concerne les ressources mobilisées pendant les processus de production agricole mais qui ne sont pas pour autant dissipées. Les ressources qui rentrent dans cette catégorie sont par exemple les sols agricoles - pour peu qu'ils soient bien gérés, non érodés, ni compactés ou pollués - ou encore la biodiversité fonctionnelle. Dans une certaine mesure, cette classe peut également comprendre les eaux superficielles dont la qualité est dégradée par l'agriculture (sous l'influence d'apports de pesticides ou d'engrais) et dont l'usage par d'autres acteurs se trouve fortement perturbé.

Fondamentalement, la protection de telles ressources consiste à préserver leur statut fonctionnel. En d'autres termes, il s'agit non seulement de conserver le stock de ces ressources mais de le conserver dans un état susceptible de contribuer encore aux processus de production, et aux autres services qu'elles procurent. Les travaux qui se sont intéressés à la protection des sols ou de la biodiversité fonctionnelle ont montré que l'état des écosystèmes agricoles avait à ce sujet une importance capitale. De même, ils ont montré que la préservation de telles ressources devait largement s'envisager à l'échelle du paysage.

Par exemple, la protection de la ressource en biodiversité fonctionnelle susceptible de rendre des services de régulation des bioagresseurs (par prédation ou parasitisme) ou de pollinisation des cultures doit s'envisager à l'échelle de la mosaïque paysagère. En effet, il a été démontré abondamment que la simplification des paysages agricoles peut conduire à des pertes importantes de biodiversité fonctionnelle et, en conséquence, à de moindres régulations de bioagresseurs par les auxiliaires des cultures (Figure 8).

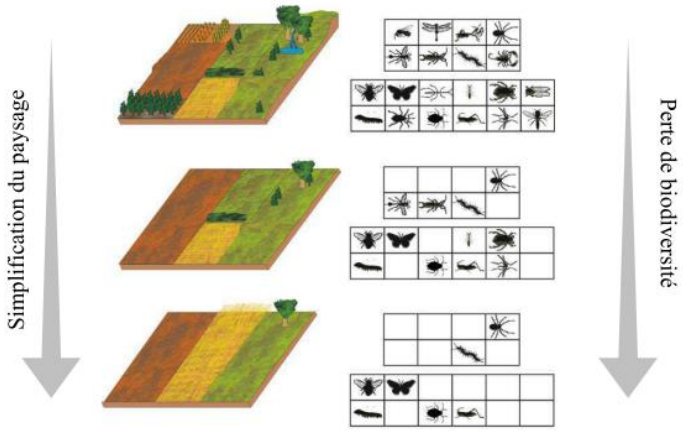

Figure 8 : Simplification des paysages agricoles et diminution de la biodiversité fonctionnelle.
Source : adapté d'après Tscharntke et al. (2007)
Figure 8: Landscape simplification and biodiversity loss.
Source: adapted from Tscharntke et al., 2007.

Parallèlement, si plusieurs travaux ont montré que l'Agriculture Biologique (AB) contribuait à mieux protéger l'état de la biodiversité fonctionnelle - et des services que celle-ci peut produire - que ne le fait l'agriculture conventionnelle (Reganold et Wachter, 2016 ; Sandhu *et al.,* 2010), d'autres travaux ont également montré que cette plus-value de l'AB dépendait en fait du type de paysage (Figure 9). Dit autrement, la plus-value de l'AB pour la conservation de biodiversité fonctionnelle est forte dans les paysages simplifiés (par exemple les paysages homogènes, avec peu d'éléments interstitiels tels que des haies ou bosquets) : dans ces paysages, l'AB contribue souvent à augmenter la diversité du paysage et à offrir des habitats pour des espèces d'importance. Ceci est dû à la diversité plus importante des cultures et à la fréquence plus élevée des espaces semi-naturels que sont les prairies dans les rotations en AB par rapport à l'agri-

culture conventionnelle. En revanche, la plus-value de l'AB se trouve réduite dans les paysages déjà hautement diversifiés : le gain de biodiversité par rapport à l'agriculture conventionnelle se trouve alors réduit (Tscharntke *et al.*, 2005). Ces exemples montrent que, si des leviers d'action existent à l'échelle du système de culture pour protéger de telles ressources, ces leviers se trouvent également à l'échelle du paysage, ce qui peut être de nature à rendre plus compliquée l'action des agronomes.

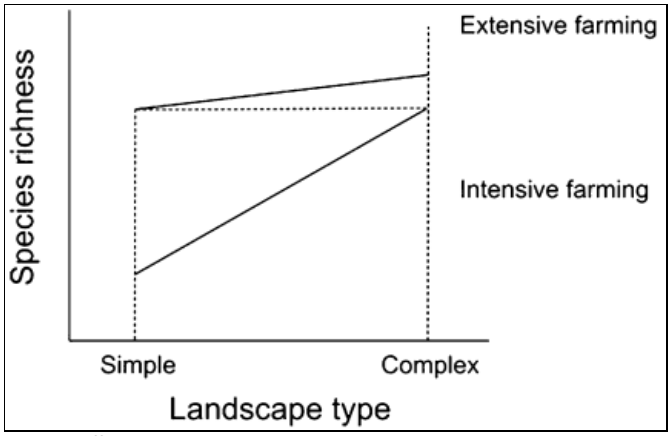

Figure 9 : Effet du paysage sur la contribution de l'agriculture extensive à la production de biodiversité fonctionnelle.
Source : Tscharntke et al. (2005)
Figure 9: Interaction between landscape and low-input agriculture effects on functional biodiversity.
Source: Tscharntke et al., 2005.

Synthèse : vers une typologie des stratégies d'action

Finalement, cette typologie montre que quatre classes de ressources peuvent être mises en évidence, et que différentes stratégies agronomiques peuvent être mises en œuvre pour protéger ces ressources (Tableau 2). Chacune de ces stratégies doit alors être envisagée au bon niveau d'organisation. L'examen de ces stratégies montre que, si l'échelle du système de culture reste souvent pertinente, les niveaux plus larges que sont l'exploitation et surtout le territoire ou le paysage doivent également être envisagés comme lieu de l'action agronomique, ce qui peut nécessiter de nouveaux outils et méthodes d'approches du travail avec les agriculteurs.

	Système de culture	**Exploitation**	**Territoire et paysage**	**Niveaux plus englobants (grande région, pays, planète)**
Ressources dissipées, non renouvelables *Stratégie d'économie d'usage*	+++	++	+	
Ressources dissipées, renouvelables *Stratégie de reconstitution des stocks*	+	+	++	
Ressources dissipées, à produit recyclable *Stratégie de recyclage*		+++	++	++
Ressources non dissipées *Stratégie d'entretien de l'état fonctionnel*		+	+++	

Tableau 2 : Typologie des ressources mobilisées en agriculture et des leviers d'action agronomique à différentes échelles
Table 2: Typology of natural resources and agricultural leverages at different scales

Bien que cette typologie des stratégies d'action porte principalement sur les pratiques agricoles, elle peut également concerner les interfaces que l'agriculture entretient avec d'autres secteurs économiques. Il en est ainsi des interactions que l'agriculture peut avoir avec des collectivités locales ou des entreprises dans les territoires ruraux : de telles interactions sont notamment à la source de processus de recyclage de la matière (ou de la chaleur) à l'échelle locale sous la forme de retour aux sols de composts urbains ou issus d'industries agro-alimentaires. Ces interactions prennent alors un sens significatif au sujet de la protection des ressources dissipables mais qui donnent lieu à un produit recyclable, l'agriculture ayant ici une contribution positive et spécifique (voir l'article de Wassenaar *et al*. dans ce numéro).

Par ailleurs, il convient de conserver à l'esprit le fait que la mise en œuvre de chacune des stratégies mentionnées ci-dessus devrait faire l'objet d'évaluation multicritères au sujet de la protection effective des ressources naturelles. En effet, il est courant de rencontrer des situations où la mise en œuvre de pratiques visant à protéger une ressource donnée s'accompagne de tensions accrues sur d'autres ressources (Payraudeau et Van der Werf, 2005). Ce type de "déplacement" de la pression peut par exemple être rencontré au sujet de stratégies appuyées sur le recours à l'agriculture de précision (à base de capteurs complexes, de drones, de robots, etc.) pour protéger des ressources naturelles dissipables et non-renouvelables : si ces stratégies peuvent être à la source de moindres consommations d'énergie fossile, elles peuvent également induire une tension plus forte sur les métaux et terres rares, fortement sollicités dans les outils de l'agriculture de précision. L'analyse multicritère des pratiques agricoles prend alors tout son sens pour détecter et évaluer ces effets de "déplacement" et aider à la conception de systèmes techniques plus durables.

Conclusion

Les éléments présentés dans cet article montrent que l'agriculture mobilise ou impacte de nombreuses ressources naturelles, parfois en quantité très importante. Il en résulte que l'agriculture présente une forme de dépendance vis-à-vis de ces ressources, ce qui l'expose dans un contexte de volatilité climatique ou économique accrue. En particulier, l'examen de la disponibilité future de ces ressources montre qu'une adaptation à leur rareté sera très certainement nécessaire dans les années et décennies à venir. Le fort impact

de l'agriculture sur ces ressources suggère également que celle-ci tire une forme de responsabilité au sujet de leur protection. La mise au point de formes d'agriculture moins dépendantes des ressources naturelles sera de nature à réduire la responsabilité et la vulnérabilité de celle-ci dans un contexte de volatilité et de raréfaction des ressources naturelles. On peut s'attendre par ailleurs à ce que la montée en puissance de concepts économiques et écologiques structurant tels que la notion d'économie circulaire appellent à une profonde réorganisation des systèmes techniques agricoles si ces concepts sont appliqués aux territoires agricoles et ruraux.

L'examen des types de ressources que l'agriculture mobilise laisse apparaître différents leviers d'action, correspondant à différentes échelles spatiales. Si les agronomes restent familiers de l'action à l'échelle du système de culture ou de l'exploitation agricole, il apparait cependant que de nombreux leviers d'action existent à l'échelle du territoire ou du paysage, parfois à l'interface avec d'autres secteurs et acteurs économiques. Bien que les connaissances sur le fonctionnement agronomique des territoires et des paysages restent encore largement à bâtir, il convient désormais pour les agronomes de se saisir de ces nouveaux lieux de l'action.

Références

Amossé C, Jeuffroy M-H, Mary B, David C, 2014. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 98:1-14.

Capowiez Y, Samartino S, Cadoux S, Bouchant P, Richard G, Boizard H, 2012. Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 55.

Cordell D, Drangert J-O, White S, 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environnemental Change*, 19:292-305.

De Visser CLM, Schreuder R, Stoddard F, 2014. The EU's dependency on soya bean import for the animal feed industry and potential for EU produced alternatives. *Oilseeds & fat Crops and Lipids*, 21:D407.

Famiglietti JS, 2014. The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4:945-948.

Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Faily GC, Gibbs HK, Helbowski JH, Holloway T, Howard EA, J. KC, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder PK, 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309:570-574.

Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Mueller ND, O'Connell C, Ray DK, West PC, Balzer C, Bennett EM, Carpenter SR, Hill J, Monfreda C, Polasky S, Rockström J, Sheehan J, Siebert S, Tilman D, Zaks DPM, 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478:337-342.

Garnett T, Appleby MC, Balmford A, Bateman IJ, Benton TG, Bloomer P, Burlingame B, Dawkins M, Dolan L, Fraser D, Herrero M, Hoffmann I, Smith PT, P.K., Toulmin C, Vermeulen SJ, Godfray HCJ, 2013. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science*, 241:33-34.

Grill G, Lehner B, Lumsdon AE, MacDonald GK, Zarfl C, Liermann CR, 2015. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and ?ow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters*, 10:015001.

Haberl H, Erb K-H, Krausmann F, Gaube V, Bondeau A, Plutzar C, Gingrich S, Lucht W, Fischer-Kowalski M, 2007. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Science*, 104:12942-12947.

Hellweg S, Milà i Canals L, 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344:1109-1113.

McGlade C, Ekins P, 2015. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 517:187-190.

Meynard J-M, Messéan A, 2014. *La diversification des cultures : lever les obstacles agronomiques et économiques*. Versailles, France, Quae.

Nowak B, Nesme T, David C, Pellerin S, 2015. Nutrient recycling in organic farming is related to diversity in farm types at the local level. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 204:17-26.

Ostrom E, 2010. *Gouvernance des biens communs. Pour une nouvelle approche des ressources naturelles*. Bruxelles, De Boeck.

Payraudeau S, Van der Werf HMG, 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107:1-19.

Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, Ciais P, Van der Velde M, Bopp L, Boucher O, Godderis Y, Hinsinger P, Llusia J, Nardin E, Vicca S, Obersteiner M, Janssens IA, 2013. Human-induced nitrogen–phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Communications*, 4:2934.

Reganold JP, Wachter JM, 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2:15221.

Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R, 2010. Organic agriculture and ecosystem services. *Environmental Science and Policy*, 13:1-7.

Service RF, 2014. New recipe produces ammonia from air, water, and sunlight. *Science*, 345:610.

Smaling EMA, Roscoe R, Lesschen JP, Bouwman AF, Comunello, E., 2008. From forest to waste: Assessment of the Brazilian soybean chain, using nitrogen as a marker. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128:185-197.

Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, Biggs R, Carpenter SR, De Vries W, De Wit CA, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace GM, Persson LM, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S, 2015. Planetary

boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347:1259855.

Thibault H (2015) En Indonésie la forêt assassinée. Le Monde, 29 novembre 2015, pp 6-7.

Tscharntke T, Klein AM, Kruess A, Steffan-Dewenter I, Thies C, 2005. Landscape perspectives on agricultural intensi?cation and biodiversity - ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8:857-874.

Van Vuuren DP, Bouwman AF, Beusen AHW, 2010. Phosphorus demand for the 1970-2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global Environnemental Change*, 20:428-439.

Viglizzo EF, Franck FC, Carreño LV, Jobbagy EG, Pereyra H, Clatt J, Pincen D, Ricard F, 2010. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17:959-973.

Yang Y, Suh S, 2015. Changes in environmental impacts of major crops in the US. *Environmental Research Letters*, 10:094016.