



HAL
open science

Vers des systèmes de grande culture moins dépendants des énergies fossiles

Frédérique Angevin, Caroline C. Colnenne-David, Marie-Helene Jeuffroy, Elise
Pelzer, Thierry Doré

► **To cite this version:**

Frédérique Angevin, Caroline C. Colnenne-David, Marie-Helene Jeuffroy, Elise Pelzer, Thierry Doré.
Vers des systèmes de grande culture moins dépendants des énergies fossiles. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 2016, 6 (1), pp.65-76. hal-02631001

HAL Id: hal-02631001

<https://hal.inrae.fr/hal-02631001>

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

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 Axérial

- 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. GOSSSELIN, 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



Vers des systèmes de grande culture moins dépendants des énergies fossiles

Towards less fossil energy-dependants cropping systems

Frédérique ANGEVIN^a - Caroline COLNENNE-DAVID^{b*} - Marie-Hélène JEUFRROY^b
Elise PELZER^b - Thierry DORÉ^b

^aINRA, UAR 1240 Eco-Innov, 78850 Thiverval-Grignon, France
^bUMR Agronomie, Inra, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850, Thiverval-Grignon, France

*Auteur correspondant caroline.colnenne@grignon.inra.fr

Résumé

Dans cet article, on traite de l'adaptation des systèmes de grande culture, finalisée par une baisse de l'utilisation des énergies fossiles. On combine une analyse des leviers agronomiques utilisables, et les résultats de trois dispositifs : un dispositif d'expérimentation factorielle permettant d'évaluer le bénéfice de l'introduction de légumineuses à l'échelle de l'itinéraire technique (mélanges d'espèces); un dispositif d'essai-système visant l'économie d'énergie fossile à l'échelle du système de culture tout en préservant un potentiel de production élevé et en atteignant de hauts standards environnementaux; plusieurs expériences de conception de systèmes de culture mobilisant différents leviers, dans des conditions variées de marché et de pédoclimats. A l'échelle de l'itinéraire technique, en culture annuelle, la consommation énergétique des mélanges graminées-légumineuses par tonne de biomasse produite est baissée d'environ un tiers par rapport aux légumineuses pures ou graminées fertilisées; en culture pluriannuelle, les mélanges non fertilisés ont les mêmes performances énergétiques que la luzerne par tonne produite, et leur consommation est deux à quatre fois plus faible que pour des graminées pures, selon la graminée considérée et le niveau de fertilisation. A l'échelle du système de culture, l'évaluation du système conçu pour diminuer la consommation d'énergie fossile permet une économie d'environ un tiers, avec toutefois une baisse des rendements sur certaines cultures. Enfin, les travaux de conception avec les agriculteurs de systèmes innovants intégrant des changements de pratique montrent qu'on peut aboutir à des systèmes aux performances simulées robustes, intégrant certains impératifs ou souhaits spécifiques des agriculteurs.

Mots-clés

Énergie fossile, système de culture, légumineuse, mélanges d'espèces.

Abstract

In this paper, we study how cropping systems could be adapted in the aim of reducing the use of fossil energy. We first identified the agronomical techniques able to contribute to this target, and then analysed three exper-

imental devices : (i) a factorial experiment allowing to assess the benefits linked to the introduction of legume crops, at the scale of the cropping plan (species mixture); (ii) a system experiment

targeting the reduction of fossil energy use on the whole cropping system, while reaching good environmental impacts and maintaining a high yield level; (iii) several experiences of cropping system design, involving various practices, in varying conditions of market and pedo-climate. At the scale of the crop management plan, for annual crops, the consumption of fossil energy from cereal-legume intercrops for each ton of biomass was decreased from one third in average compared to the consumption of pure legume crops of pure fertilised grasses; for multi-year crops, non-fertilised mixtures have similar energetic performances than alfalfa, for each ton of biomass produced, and their consumption is two to four times lower than for pure grasses, according to the species and the fertilisation level. At the cropping system level, the assessment of the cropping system designed in the aim of reducing fossil energy use allows to save one third of the energy, yet with a yield decrease on some crops. Finally, the design workshops of innovative cropping systems, with farmers, showed that it is possible to reach systems with robust simulated performances, while taking into account some specific constraints or wishes from the farmers.

Introduction

Si l'échéance d'épuisement des ressources en énergie fossile reste très incertaine, il n'en reste pas moins que ces ressources sont limitées, diminuent, que la volatilité des prix des carburants qui en sont issus est une difficulté pour les Etats et les consommateurs, enfin que la baisse des réserves en ressources classiques (gaz naturel, pétrole) amène à exploiter des ressources dites « non conventionnelles » (par exemple gaz de schiste) avec de potentiels effets environnementaux délétères.

Par rapport à d'autres secteurs d'activité, l'agriculture est faiblement consommatrice d'énergie. Selon les chiffres du Commissariat général au développement durable (CGDD, 2015), elle est responsable en France de moins de 3% de la consommation d'énergie primaire. Cette énergie est essentiellement de l'énergie fossile, consommée par combustion de produits pétroliers (locomotion des tracteurs et autres engins agricoles, chauffage des serres et des bâtiments d'élevage, séchage des produits récoltés humides...) (Lamotte et Martin, 2014). A cette consommation directe, il faut ajouter environ la même consommation énergétique dite indirecte, provenant de la fabrication des machines et intrants, en premier lieu les engrais azotés (ADEME, 2014). La relativement faible consommation énergétique de l'agriculture masque cependant deux problèmes plus importants.

Tout d'abord, les postes responsables des consommations énergétiques recouvrent assez bien les postes d'émissions de polluants, notamment atmosphériques. Ainsi selon les résultats du CITEPA en 2015¹, les émissions de NH₃, qui sont dues en France pour 98% à l'agriculture, proviennent pour un tiers des engrais de synthèse, et pour deux tiers des déjections animales; la contribution de l'agriculture au pouvoir de réchauffement global est, quant à elle, de l'ordre de 20%², pour moitié due aux émissions de protoxyde d'azote, très lié à l'utilisation des engrais azotés.

Par ailleurs, les modes de production conventionnels en agriculture sont aujourd'hui très dépendants des énergies fossiles (Pelletier *et al.*, 2011; Markussen et Østergård, 2013),

¹ <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/ammoniac>

² Source CITEPA : <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/potentiel-rechauffement-global-a-100-ans>

et la rentabilité de l'activité montre une sensibilité importante aux fluctuations de leurs prix, malgré la détaxation dont bénéficie le fioul agricole. L'énergie directe et indirecte représentait en 2010 à l'échelle de la « ferme France » environ 13% des charges variables (ADEME, 2012). Les systèmes les plus sensibles sont l'horticulture et le maraîchage d'une part, et les grandes cultures d'autre part (*ibidem*).

La construction de systèmes de culture moins dépendants des énergies fossiles constitue donc un enjeu considérable. Après une brève analyse bibliographique, cet article présente, pour le secteur des grandes cultures, plusieurs résultats de recherche permettant d'évaluer les économies d'énergie fossile possibles, en station et en parcelles agricoles, et d'estimer simultanément les conséquences des changements techniques opérés sur les différentes dimensions de la durabilité.

Quels leviers en grande culture ?

Afin d'identifier les évolutions à privilégier dans les systèmes de grande culture, dans le but de réduire leur dépendance à l'énergie fossile, il est nécessaire de connaître la consommation d'énergie fossile des différents postes de ces systèmes. L'analyse de cycle de vie réalisée par Nemecek *et al.* (2008) sur différents systèmes de grande culture indique la hiérarchie des postes de l'itinéraire technique en termes de consommation d'énergie. Pour la majorité des cultures analysées (colza, blé, orge), toutes fertilisées, le premier poste de consommation concerne l'utilisation d'engrais azotés minéraux, représentant plus de 50% de la consommation d'énergie de l'itinéraire technique. Ceci est lié à l'énergie consommée lors de l'épandage de l'engrais azoté, du transport et, surtout, lors de la production de l'engrais minéral azoté (Jensen *et al.*, 2012). Le procédé de Haber-Bosch est en effet très consommateur en énergie. Selon les auteurs, l'énergie fossile nécessaire à la synthèse de l'engrais minéral (entre 0,73 et 1 tonne équivalent pétrole par tonne d'N produit, selon le type d'engrais minéral azoté) représente 1 à 2% de l'énergie totale consommée dans le monde (Smil, 2001 ; Jenkinson, 2001 ; Jensen *et al.*, 2012). Le second poste concerne le travail du sol, représentant 20 à 25% de la consommation d'énergie de l'itinéraire technique. La mise en œuvre d'un travail du sol superficiel, à la place du labour, permet de réduire de 6 à 11% la consommation d'énergie de l'itinéraire technique, selon le type de sol (Labreuche *et al.*, 2011). La consommation correspondant à l'ensemble des techniques liées à l'utilisation de machines (apports d'engrais ou de produits phytosanitaires, semis, récolte) représente 15% à 20% de la consommation totale ; l'irrigation peut représenter jusqu'à 20% de la consommation (Nemecek *et al.*, 2015). Cette hiérarchie des postes de consommation d'énergie est confirmée par Pelletier *et al.* (2011).

Compte tenu de son importance, il est utile de s'intéresser de manière plus approfondie à l'utilisation des engrais minéraux et aux possibilités de substitution que représentent les légumineuses (paradoxalement moins étudiées que la simplification du travail du sol). À l'échelle de la culture, la consommation en énergie d'une légumineuse à graines (non fertilisée en azote) est moitié moins importante que celle d'une culture fertilisée, et cette réduction est de 14% à l'échelle d'une succession de cinq ans dans laquelle on rem-

place une culture fertilisée par une légumineuse (Nemecek *et al.*, 2008). Cette estimation ne tient toutefois pas compte de la réduction de la fertilisation azotée permise par la légumineuse sur la culture suivante. Toujours à l'échelle de la culture, Jensen *et al.* (2012) présentent des comparaisons de coûts énergétiques de production issues d'expérimentations conduites dans différents pays. Par exemple, le coût énergétique de production par hectare de légumineuses à graines est comparé à celui des céréales. Le coût énergétique de production du pois est réduit de 45% par rapport à celui de l'orge au Danemark (Peoples *et al.*, 2009) et de 45-48% par rapport à celui du blé en Amérique du Nord (Zentner *et al.*, 2004 ; Rathke *et al.*, 2007), alors que le coût énergétique de production du pois et de la féverole est 36% plus faible que celui du blé ou de l'orge et 60% plus faible que celui du maïs en Suisse (Köpke et Nemecek, 2010). De façon similaire, ce coût pour le soja est 39% plus faible que celui du maïs en Amérique du Nord (Zentner *et al.*, 2004 ; Rathke *et al.*, 2007). Comparé à d'autres cultures que des céréales, le coût énergétique de production du pois est 35% plus faible que le coût énergétique de production du lin en Amérique du Nord (Zentner *et al.*, 2004 ; Rathke *et al.*, 2007) et de 25% moindre que celui du colza en Suisse (Köpke et Nemecek, 2010). Enfin, au Danemark, une comparaison entre prairie trèfle-graminées et prairie de graminées pures montre une réduction de 5 % du coût quand la légumineuse est présente (Peoples *et al.*, 2009). Cependant, comme les légumineuses à graines présentent en général des rendements biomasse ou grains inférieurs aux autres cultures, la fixation symbiotique ayant un coût métabolique pour ces espèces, la réduction du coût énergétique de production des légumineuses est moins importante quand celui-ci est ramené à l'unité de biomasse ou de grain produite (Jensen *et al.*, 2012), ce qui n'est pas forcément le cas par unité de protéine.

Les légumineuses permettent des bénéfices du point de vue de l'azote non seulement sur la culture elle-même mais aussi sur les cultures suivantes qui nécessitent un apport d'azote, du fait de la moindre absorption de l'azote du sol par ces espèces et de l'azote laissé par les résidus, permettant des apports d'engrais moindres l'année qui suit (e.g., Peoples *et al.*, 2009). Selon les conditions de culture et le cortège de bioagresseurs présent, les légumineuses peuvent aussi permettre une réduction de l'utilisation de pesticides à l'échelle de la succession, du fait de la diversification de la rotation (e.g., Meynard *et al.*, 2014). Ainsi, des analyses de cycle de vie à l'échelle de la succession culturale, rapportées par Jensen *et al.* (2012), ont montré que les rotations avec légumineuses permettent de réduire le coût énergétique de production de 13 à 24% en moyenne en comparaison aux rotations sans légumineuse étudiées dans quatre régions d'Amérique du Nord (résultats de Zentner *et al.*, 2001, 2004 ; Rathke *et al.*, 2007). La réduction est de 12 à 30% en moyenne dans trois des quatre régions d'Europe considérées par Nemecek *et al.* (2008), l'augmentation du coût énergétique observée dans la quatrième région concernant une succession bas niveau d'intrants où le pois remplaçait un tournesol, peu fertilisé et peu traité.

Évaluation expérimentale des bénéfices énergétiques de mélanges graminées / légumineuses sous différents niveaux de fertilisation azotée

Afin de comparer les coûts énergétiques de production de différentes légumineuses cultivées pures ou en association avec des graminées, une expérimentation a été mise en place à Versailles pendant trois ans 2010-2013 ; surface de l'essai : 0,6 ha (Pelzer, 2015). L'objectif général était d'évaluer les performances d'associations graminées-légumineuses pour différents procédés de transformation en bioénergie envisagés (production de bioéthanol, méthanisation, combustion...). Le nombre de modalités (associations et cultures pures) testées était de 20 (9 modalités de cultures pluriannuelles, 11 modalités de cultures annuelles d'automne ; cf. Tableau 1). Les espèces choisies étaient soit des espèces qui ont été jugées intéressantes comme culture énergétique en culture pure, soit des espèces déjà utilisées en associations pour une vocation fourrage. Pour les modalités annuelles d'une part, et pluriannuelles d'autre part, toutes les cultures pures et les associations graminées-légumineuses ont été testées. Deux modalités de fertilisation azotée ont été appliquées pour les graminées pures et les associations : sans et avec azote, avec une demi-dose pour les associations comparées aux graminées pures. Les modalités avec vesce n'ont pas été testées la deuxième année du fait d'un problème technique. Les modalités annuelles ont été fauchées en plante entière au stade grain pâteux du triticale (deuxième quinzaine de juin) alors que les modalités pluriannuelles ont été fauchées trois fois par an, en mai, juillet et septembre.

Le coût énergétique de production a été estimé selon la méthode Indigo® (Bockstaller *et al.*, 2009), en prenant en compte les interventions machines (travail du sol, applications de pesticide et d'engrais azoté, récolte), ainsi que les coûts énergétiques de production de l'engrais minéral azoté et des pesticides. Les coûts de fertilisation P et K n'ont pas été pris en compte car ils ne variaient pas entre les modalités. Pour les cultures pluriannuelles, le coût lié aux opérations de préparation du sol et semis la première année ont été répartis sur les trois années d'essais. Le coût énergétique pour produire une tonne de biomasse a été estimé à l'aide du ratio coût énergétique de production/rendement biomasse machine. Ce dernier correspond au rendement en biomasse obtenu avec une faucheuse sur 30 m², à la récolte pour les cultures annuelles, et cumulé sur les trois fauches chaque année pour les cultures pluriannuelles.

Les résultats montrent que les coûts énergétiques de production sont supérieurs pour les modalités fertilisées comparées aux modalités non fertilisées, dont les légumineuses pures (Figure 1).

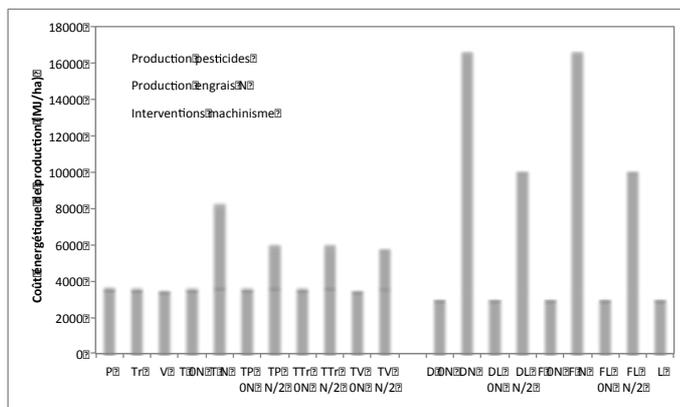


Figure 1 : Coût énergétique de production moyenné sur les trois années de production, pour les différentes modalités testées

En ce qui concerne les coûts énergétiques pour produire une tonne de biomasse (Figure 2), les légumineuses annuelles sont moins bien classées du fait d'une plus faible production de biomasse, alors que les associations légumineuses-graminées sont intéressantes (rendements plus élevés pour une fertilisation nulle ou plus faible que les graminées pures). La vesce et le pois purs présentent les valeurs les plus élevées par rapport aux autres modalités en 2011 et 2012 respectivement, du fait des plus faibles rendements, alors que le triticale fertilisé présente la valeur la plus élevée par rapport aux autres modalités en 2013, du fait de la fertilisation azotée. L'association triticale-trèfle non fertilisée présente la valeur la plus faible par rapport aux autres modalités en 2011 et 2012 et l'association triticale-pois présente la valeur la plus faible par rapport aux autres modalités en 2013. Pour les modalités pluriannuelles, les résultats sont en faveur de la luzerne pure et des associations (Figure 2). Le dactyle fertilisé présente les valeurs les plus élevées pour les trois années, alors que les associations non fertilisées et la luzerne pure présentent les valeurs les plus faibles.

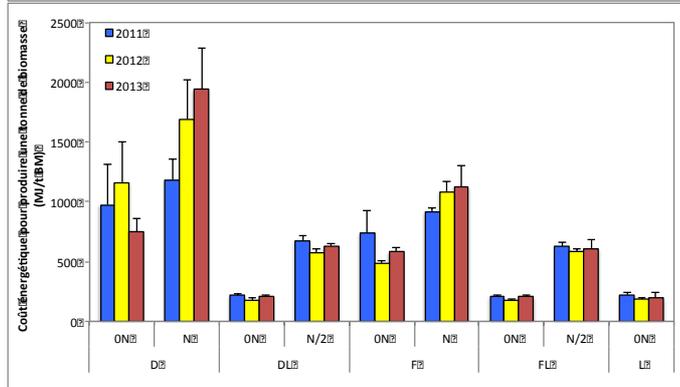
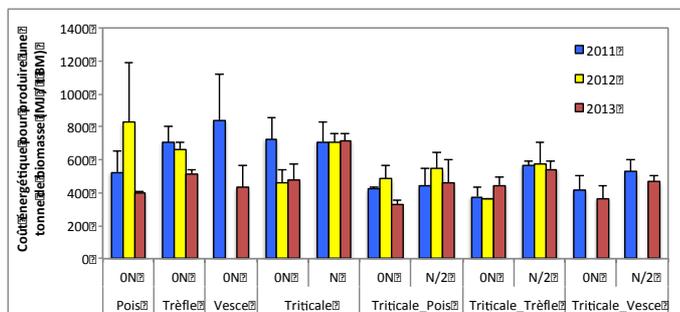


Figure 2 : Coût énergétique pour produire une tonne de biomasse pour les 3 années d'expérimentation, modalités annuelles en haut, et pluriannuelles en bas. Les barres représentent les intervalles de confiance à 95%.

| Culture | Densité et date de semis | Fertilisation N | Codes modalités |
|--------------------------|---|--|-----------------|
| Pois fourrager | 80 (année 1) / 60 plantes m ⁻² (années 2-3) 8 / 11 / 24 octobre (années 1-2-3) | 0 UN | P |
| Trèfle violet | 30 kg graines ha ⁻¹ 8 / 11 / 24 octobre (années 1-2-3) | 0 UN | Tr |
| Vesce | 80 (année 1) / 60 plantes m ⁻² (années 2-3) 8 / - / 24 octobre (années 1-2-3) | 0 UN | V |
| Triticale | 300 plantes m ⁻² | 0 UN | T oN |
| Triticale | 300 plantes m ⁻² | 80 (année 1) ou 100 UN (années 2-3) | T N |
| Triticale-Pois | 150-40/30 plantes m ⁻² 8 / 11 / 24 octobre (années 1-2-3) | 0 UN | TP oN |
| Triticale-Pois | 150-40/30 plantes m ⁻² 8 / 11 / 24 octobre (années 1-2-3) | 40 (année 1) ou 50 UN (années 2-3) | TP N/2 |
| Triticale-Trèfle | 150 plantes m ⁻² -15 kg ha ⁻¹ 8 / 11 / 24 octobre (années 1-2-3) | 0 UN | TTr oN |
| Triticale-Trèfle | 150 plantes m ⁻² -15 kg graines ha ⁻¹ 8 / 11 / 24 octobre (années 1-2-3) | 40 (année 1) ou 50 UN (années 2-3) | TTr N/2 |
| Triticale-Vesce | 150-40/30 plantes m ⁻² 8 / - / 24 octobre (années 1-2-3) | 0 UN | TV oN |
| Triticale-Vesce | 150-40/30 plantes m ⁻² 8 / - / 24 octobre (années 1-2-3) | 40 (année 1) ou 50 UN (années 2-3) | TV N/2 |
| Modalités pluriannuelles | | | |
| Dactyle | 23 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 0 UN | D oN |
| Dactyle | 23 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 80-100-80 (année 1), 100-100-100 (année 2), ou 100-80-80 (année 3) | D N |
| Dactyle-Luzerne | 11.5-11.5 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 0 UN | DL oN |
| Dactyle-Luzerne | 11.5-11.5 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 40-50-40 (année 1), 50- 50-50 (année 2) ou 50- 40-40 (année 3) | DL N/2 |
| Féтуque élevée | 23 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 0 UN | F oN |
| Féтуque élevée | 23 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 80-100-80 (année 1), 100-100-100 (année 2), ou 100-80-80 (année 3) | F N |
| Féтуque-Luzerne | 11.5-11.5 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 0 UN | FL oN |
| Féтуque-Luzerne | 11.5-11.5 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 40-50-40 (année 1), 50- 50-50 (année 2) ou 50- 40-40 (année 3) | FL N/2 |
| Luzerne | 23 kg graines ha ⁻¹ 24 août | 0 UN | L |

Tableau 1 : Modalités testées dans l'expérimentation mise en place à Versailles par l'UMR Agronomie pour trois années. P : Pois, Tr : trèfle, V : Vesce, T : Triticale, D : Dactyle, F : Féтуque, L : Luzerne, UN : unité d'azote.

Comment mettre en œuvre ces leviers à l'échelle du système de culture ?

Dans le cadre du projet «Systèmes de culture innovants sous contraintes» (SIC), quatre systèmes de culture innovants ont été conçus, puis mis à l'épreuve dans le cadre d'une expérimentation de longue durée.

Les objectifs retenus pour la construction de ces systèmes étaient triples :

- satisfaire une contrainte majeure (soit réduire la consommation d'énergie fossile, soit s'interdire l'utilisation de pesticides, soit limiter les émissions de gaz à effet de serre) ;
- respecter des objectifs environnementaux multiples (diminuer les impacts des pesticides sur le milieu, limiter les risques de pertes de nitrate vers les nappes souterraines...) ;
- atteindre des niveaux de production élevés.

Les systèmes évalués au champ résultent de nombreux cycles d'itérations d'évaluation *ex ante* (méthode fondée sur le prototypage, Loyce et Wery, 2006) et combinent différents leviers agronomiques. Ils concernent les systèmes de grande culture adaptés au contexte pédoclimatique du Bassin parisien, où est conduite l'évaluation expérimentale (78). Deux des quatre systèmes de culture, en lien avec la problématique énergétique, sont présentés ici. Le système « productif à hautes performances environnementales » (PHPE), utilisé comme référence énergétique, a pour objectifs de satisfaire un ensemble de critères environnementaux quantifiés et d'atteindre, dans ce cadre, une production élevée. Les objectifs environnementaux sont satisfaits lorsque tous les critères agro-environnementaux de la méthode Indigo® (Bockstaller et Girardin, 2000) atteignent une note au moins égale à 7. Le système "énergie moins" (En-) est soumis à une contrainte environnementale forte : la consommation d'énergie fossile doit être réduite de moitié à l'échelle du système de culture par rapport au système PHPE. De plus, il doit satisfaire les mêmes objectifs environnementaux que le système PHPE et produire des rendements aussi élevés que possible. Les systèmes retenus sont pilotés par des jeux de règles de décision dont la construction fait partie intégrante du travail de conception (Debaeke *et al.*, 2009).

L'évaluation expérimentale au champ se déroule sur les terres de la ferme d'AgroParisTech (Grignon, 78) depuis 2009. La parcelle expérimentale, d'une surface de plus de six hectares, est située sur des sols limoneux, très homogènes et profonds. Les principales stratégies agronomiques mobilisées sont décrites dans le tableau 2. Dans le système PHPE, afin d'augmenter la biodiversité et limiter l'utilisation des pesticides, une rotation plus longue que celles couramment observées en Ile-de-France a été retenue (cinq cultures au lieu de trois fréquemment : féverole d'hiver – blé tendre d'hiver – colza d'hiver – blé tendre d'hiver – (moutarde comme culture intermédiaire) – orge de printemps). L'implantation d'une légumineuse permet de réduire les apports d'engrais minéraux et le semis systématique d'une interculture avant la culture de printemps vise à réduire la lixiviation du nitrate. Pour être représentative du Bassin parisien, la succession culturale comporte plusieurs espèces de céréales à paille. La pratique d'un seul labour à l'échelle de la succession, avant l'implantation de l'orge de prin-

temps, permet de réduire la consommation d'énergie fossile. Les choix des variétés, des dates et densités de semis spécifiques pour chacune des espèces sont raisonnés de manière à réduire la pression de bioagresseurs et donc les apports de produits phytosanitaires. Les objectifs de production ont été définis selon les potentialités pédoclimatiques du site expérimental et pour des techniques culturales définies *a priori*. Ils s'appuient sur des connaissances acquises localement ou à l'échelle régionale.

Dans le système En-, la réduction de la consommation d'énergie fossile est obtenue selon deux voies, correspondant aux leviers majeurs identifiés ci-dessous. La consommation indirecte d'énergie est réduite par la diminution de la fertilisation azotée permise par l'implantation à la fois de nombreuses légumineuses (en culture principale, associée à une autre espèce ou en espèce d'interculture) et d'une espèce à forte efficacité d'utilisation de l'azote (avoine). Par ailleurs, la suppression du travail du sol, dont le labour, associée à la pratique de semis direct, contribue à la diminution de la consommation directe d'énergie. Comme pour le système PHPE, les espèces de céréales à paille sont bien représentées dans la succession (féverole d'hiver – blé tendre d'hiver – lin oléagineux d'hiver – association de blé tendre d'hiver et de trèfle blanc – maintien du trèfle blanc comme culture intermédiaire – avoine de printemps) et le choix de variétés, de dates et densités de semis spécifiques conduisent *a priori* à réduire les apports de produits phytosanitaires. Pour satisfaire la contrainte énergétique, les objectifs de production ont été réduits de 20% par rapport au système PHPE.

| Objectifs et contraintes des systèmes innovants | Stratégies agronomiques | Pratiques culturales mises en œuvre |
|---|---|--|
| Réduire la consommation d'énergie fossile (Système En-) | <ul style="list-style-type: none"> *Energie indirecte : réduire la fertilisation azotée minérale *Energie directe : réduire l'utilisation des machines très consommatrices en énergie fossile | <ul style="list-style-type: none"> Inclure une large gamme d'espèces de légumineuses dans la rotation (comme culture principale, intermédiaire ou associée) Éliminer les labours et utiliser un semoir de semis direct |
| Réduire l'utilisation des pesticides (Systèmes PHPE et En-) | <ul style="list-style-type: none"> *Réduire le pool des bioagresseurs *Maintenir des auxiliaires de culture *Réduire les impacts des bioagresseurs | <ul style="list-style-type: none"> *Allonger la durée de la rotation *Semer un large éventail d'espèces différentes *Alterner systématiquement les périodes de semis *Réaliser des faux semis pour favoriser l'émergence des adventices et les éliminer *Pratiquer des désherbages mécaniques *Pratiquer des labours peu profonds pour maintenir les populations de <i>carabidae</i>, prédateurs des limaces *Diminuer la production de biomasse aérienne en réduisant les densités de semis et la fertilisation azotée *Choisir des variétés (des mélanges variétaux) présentant une large gamme de résistance aux maladies *Modifier les dates et densités de semis |
| Réduire la lixiviation du nitrate (Systèmes PHPE et En-) | Diminuer les quantités de nitrate dans les sols au cours de l'automne et l'hiver | <ul style="list-style-type: none"> *Semer des cultures pièges à nitrate avant toute culture de printemps *Interdire la fertilisation azotée en automne et hiver |
| Favoriser le stockage de carbone dans le sol (Systèmes PHPE et En-) | Choisir les espèces selon la capacité de leurs résidus à stocker du C | *Inclure plusieurs cultures de céréales dans la rotation |

Tableau 2 : Principales stratégies agronomiques et pratiques culturales associées, mobilisées pour répondre aux objectifs et contraintes assignés aux systèmes de culture innovants

Les consommations d'énergie fossile sur l'ensemble du premier cycle de rotation sont les suivantes : avec 5201 (+/- 502) MJ.ha⁻¹.an⁻¹, la réduction de consommation d'énergie fossile du système En- n'est que de 33% par rapport au système PHPE (7755 +/- 711 MJ.ha⁻¹.an⁻¹), l'objectif n'est donc pas atteint. Toutefois, la satisfaction de cette contrainte est rendue difficile par les très bonnes performances énergétiques du système de référence. Dans ces deux systèmes, la part de la consommation d'énergie indirecte, dont la fertilisation minérale est le principal composant, est proche de 50%. La différence entre les systèmes est de 37%, pour des niveaux moyens de fertilisation de 19 (+/-6) kg N.ha⁻¹.an⁻¹ et 56 (+/-11) kg N .ha⁻¹.an⁻¹ dans les systèmes En- et PHPE respectivement. La consommation d'énergie directe du système En-, relative à l'utilisation du matériel agricole et à la pratique du non labour, est réduite de 27%. L'efficacité énergétique (i.e. énergie produite/énergie totale utilisée) du système En- (13.71+/-2.10) n'est pas significativement supérieure à celle du système PHPE (12.41+/-1.07). La grande variabilité des valeurs du système En- est liée aux variations importantes des niveaux de production (e.g., la culture de blé d'hiver associée au trèfle blanc a produit respectivement dans les trois répétitions 6.0, 6.1 et 0.8 t.ha⁻¹, à 0% d'humidité).

L'une des originalités de ces systèmes est qu'ils ont été conçus *a priori* pour répondre à une multiplicité d'objectifs. Leur atteinte induisant des compromis entre les leviers techniques mobilisés, la présentation des autres performances est nécessaire. Les objectifs environnementaux des deux systèmes sont atteints (les valeurs des indicateurs agro-environnementaux sont toutes supérieures à la note 7, cf. Figure 3), à l'exception du critère de biodiversité des espèces implantées dans le système PHPE (la valeur est de 6.8). On notera que l'outil Indigo© utilisé n'est pas très sensible aux variations des flux d'azote, ce qui explique la faible différence de note entre les deux systèmes en termes de consommation énergétique. Les niveaux de production varient selon les systèmes de culture et les espèces.

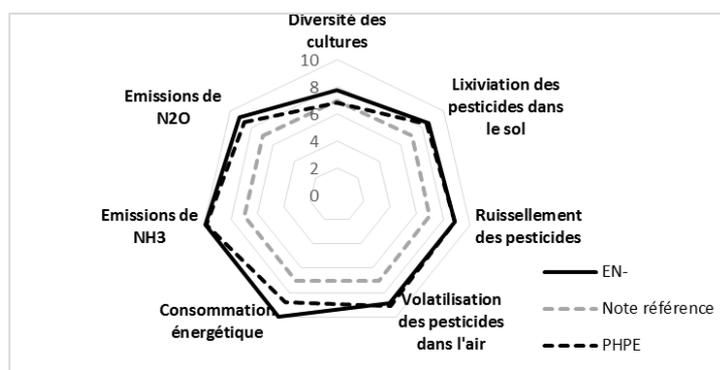


Figure 3 : Évaluation des performances environnementales des systèmes PHPE (Productif à haute performance environnementale) et En- (Énergie moins) de l'essai SIC à Grignon à l'issue du premier cycle de rotation (selon la méthode Indigo)

Pour améliorer les performances du système En-, des évolutions dans les stratégies et les leviers mobilisés ont été envisagées. Elles sont actuellement mises en œuvre dans un second cycle d'évaluation expérimentale. La principale amélioration concerne le remplacement de la culture du lin, difficile à conduire en non labour et avec peu d'herbicides, par une culture de colza associée à des légumineuses gélives. Les performances de ce nouveau prototype seront analysées à l'issue du cycle de rotation, soit en 2018.

Du prototype en station aux systèmes mis en pratique chez les agriculteurs

Dans le projet SYSCLIM³ a été abordée la conception, avec les acteurs de terrain, de systèmes de culture visant à l'atténuation de l'impact de l'agriculture sur le changement climatique. Ces systèmes visent à la réduction des émissions de GES (gaz à effet de serre), l'amélioration du stockage du carbone, et incluent une composante relative à l'efficacité énergétique, d'où leur intérêt ici. Ils doivent aussi répondre à des enjeux de durabilité environnementale, économique et sociale. Enfin, le projet comporte aussi une étude de la faisabilité de l'appropriation par les agriculteurs des systèmes conçus. La région Champagne-Ardenne, zone de collecte de la coopérative VIVESCIA, a été retenue comme zone d'étude. Ces travaux ont été menés dans deux régions agricoles illustrant l'hétérogénéité et la diversité des contextes pédoclimatiques et sociotechniques que la

coopérative rencontre dans ses actions de développement agricole : il s'agit de la région de Châlons-en-Champagne, en sol de craie, et de celle du Barrois, en sol argilo-calcaire.

Trois études, préalables à la phase de conception, ont été menées :

- une analyse des leviers agronomiques mobilisables ;
- une enquête auprès d'agriculteurs de deux groupes, suivis dans chacune de ces deux régions, permettant de déterminer leurs objectifs et leurs marges de manœuvre pour la mise en œuvre de systèmes innovants ;
- une caractérisation des systèmes existants (voir Tableau 3) accompagnée d'une évaluation *a priori* de leur durabilité avec le modèle MASC^{®4} (Sadok *et al.*, 2009 ; Craheix *et al.*,

2012), permettant une évaluation multicritère selon les trois piliers du développement durable, pour l'analyse de leurs forces et faiblesses (Cf. Figure 4). MASC[®] permet la réalisation d'évaluations multiples en faisant varier les poids accordés à chacun des critères.

La plupart des leviers identifiés pour la réduction des GES sont ceux qui amènent à une moindre utilisation des énergies fossiles dans les systèmes de grande culture et recourent ceux déjà évoqués dans les sections précédentes : réduction du travail du sol (des techniques culturales simplifiées au semis direct), insertion de légumineuses en culture principale, en association ou en culture relais, insertion de cultures faiblement exigeantes en azote (betterave, chanvre, tournesol...), de cultures pièges à nitrate dans les intercultures longues, réduction de la dose d'azote minéral résultant des trois modifications techniques précédentes, réduction des apports d'azote minéral liquide en faveur d'azote apporté sous forme d'ammonitrate et sous forme organique pour réduire les émissions de N₂O.

³ 2013 - 2016 ; financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel d'offres REACTIF.

⁴ L'outil MASC (pour Multi-attribute assessment of the Sustainability of Cropping systems) est un modèle permettant d'évaluer la durabilité globale d'un système de culture, en s'appuyant sur une évaluation des trois dimensions usuellement distinguées dans la durabilité (économique, sociale, et

environnementale) à travers 39 critères. Pour évaluer un système de culture, il faut renseigner chacun des critères qui se présentent de manière qualitative sous forme de trois à cinq classes ; MASC permet ensuite une agrégation progressive des critères, selon un « arbre » qui, partant des 39 critères élémentaires, permet de remonter progressivement pour disposer *in fine* d'une évaluation de la durabilité globale. L'agrégation des critères se fait à l'aide de règles de décision de type « si - alors ». MASC propose, ou impose dans quelques cas, des règles d'agrégation.

| Type de SDC | sol | Rotation | Fréquence du labour |
|------------------|-----------------|--|---------------------|
| TCS-réf (témoin) | Argilo calcaire | Colza - BTH- Orge H | 1/3 |
| TCS-asso | | Colza Féverole – BTH - Orge H - Pois P – BTH – Maïs-ens trèfle B (TB)- Orge H | 2/7 |
| TCSL- pure | | Colza – BTH - Orge P - Pois H – BTH - Tournesol - Orge H | 0 |
| SD-asso | | Colza Féverole – Orge H – (Mcl) BTH – (Mcl) Orge H - (Mcl) Pois H – (Mcl) BTH - (Mcl) Tournesol trèfle B – BTH | 0 |
| Lab réf (témoin) | Craie | Colza – BTH - (Mout) Pois P - (Mout) BS –BTH – Orge H – Luz (x 2)- BTH - (Mout) BS | 9/10 |
| TCS-asso | | Colza (TB)– (TB) BTH– (Mcl) Chanvre – BS - BTH (luzerne)- Luzerne(x3)-BTH - (Mcl) BS – Orge P - (Mcl) Pois P | 2/12 |
| SD-asso | | Colza (TB)– (TB) - BTH– (Mcl) Chanvre – BS - BTH (luzerne)- Luzerne(x3)-BTH - (Mcl) BS – Orge P - (Mcl) Pois P | 0 |

Tableau 3 : Représentation simplifiée des systèmes de culture étudiés

TCS : techniques culturales simplifiées – faible fréquence de labour, TCSL : absence de labour, SD : semis direct, Lab : labour fréquent.

Les cultures associées et celles qui ne sont pas récoltées sont en indice et les intercultures sont entre parenthèses.

BS : Betterave sucrière, BT : Blé tendre, Ens : ensilage, H : hiver, Luz : Luzerne, Mcl : Mélange céréales – légumineuses, Mout: Moutarde, P : Printemps, TB : trèfle blanc

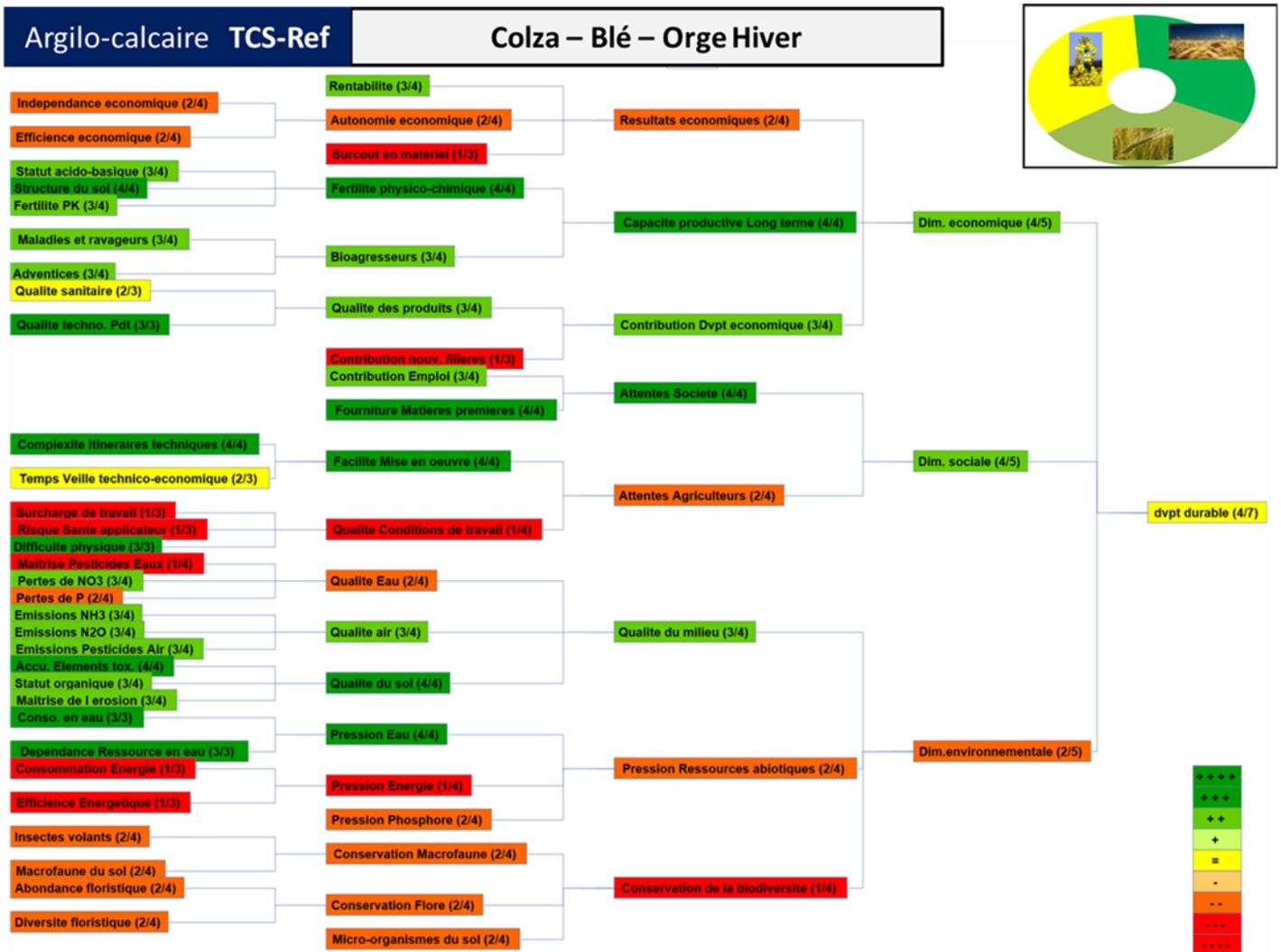


Figure 4a : Évaluation de la durabilité du système de culture actuel de la région du Barrois (sol argilo-calcaire)

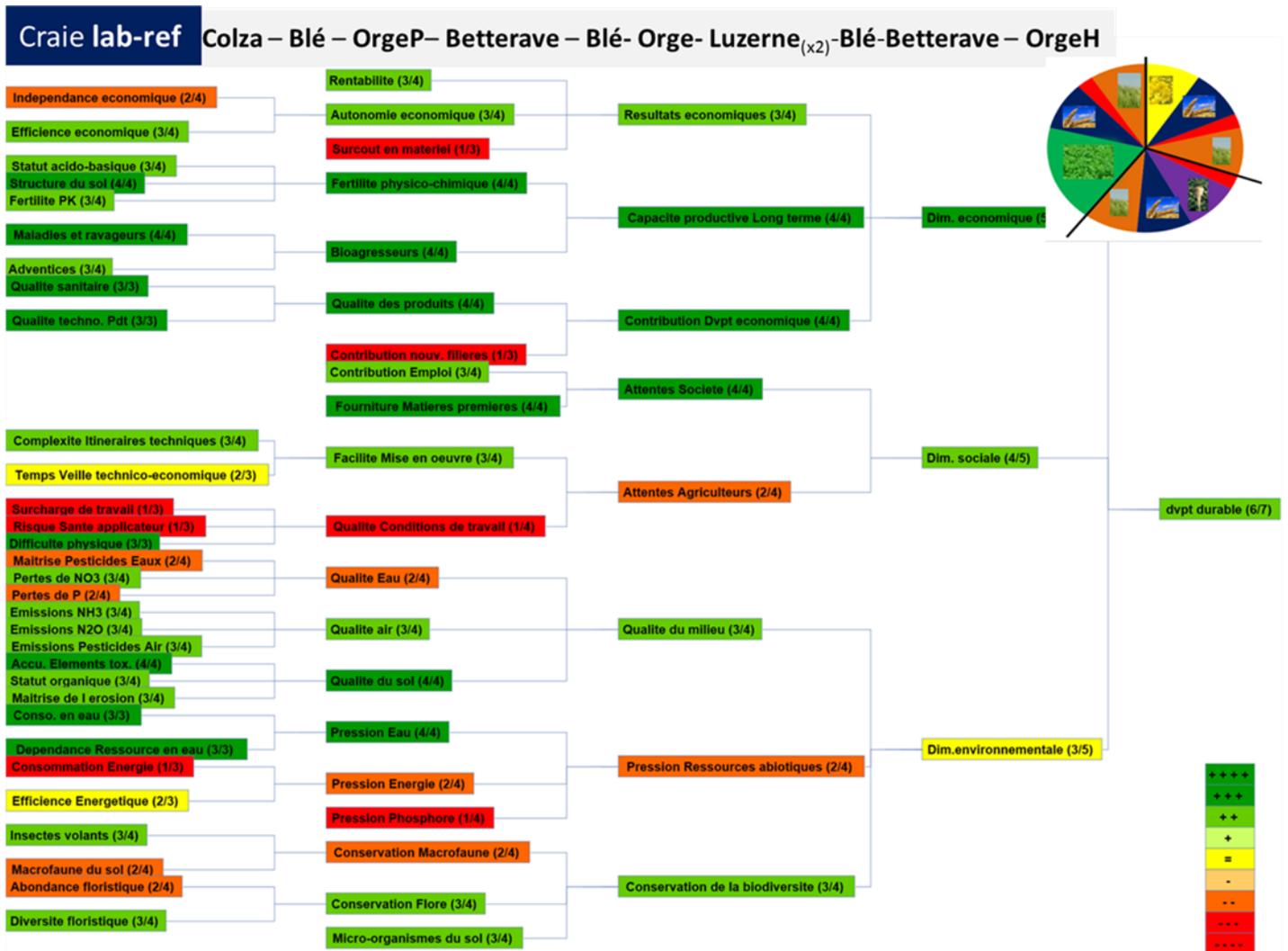


Figure 4b : Évaluation de la durabilité du système de culture actuel de Châlons-en-Champagne (sol de craie)

Les résultats des évaluations *a priori* des systèmes existants ont été présentés et discutés avec les agriculteurs et les conseillers agricoles impliqués dans ce projet. Les principaux enseignements sont les suivants : (i) d'après les participants et conformément aux résultats obtenus, les différences de potentiel de rendement ainsi que les opportunités économiques de diversifier les cultures dans la rotation influenceraient fortement les performances globales du système : ainsi, la durabilité globale obtenue avec MASC® est supérieure dans la région de Châlons-en-Champagne (note de 6/7) car la fertilité physico-chimique et la diversité des cultures permises par les filières en place permettent d'obtenir de meilleurs résultats techniques avec moins d'intrants que dans le Barrois (note MASC®= 4/7) ; (ii) dans ces deux régions, la plus grande marge de progression concerne la dimension environnementale ; (iii) les améliorations potentielles et attendues des performances globales des systèmes de culture sont plus importantes dans la région du Barrois que dans celle de Châlons-en-Champagne. L'étape suivante a consisté en la réalisation de deux ateliers de co-conception de systèmes de culture adaptés aux diffé-

rents contextes pédoclimatiques, mais aussi aux contraintes et objectifs propres des agriculteurs et répondant aux enjeux environnementaux cités plus haut. Les systèmes conçus peuvent être plus ou moins en rupture vis-à-vis des systèmes existants (Meynard, 2012 ; Petit *et al.*, 2012). L'enjeu de cette étape était de produire une gamme de systèmes innovants allant du changement de pratiques (optimisation de la gestion de l'azote, suppression du labour systématique par exemple) à des modifications plus profondes des systèmes (allongement des rotations avec introduction de cultures non pratiquées jusqu'alors - légumineuses par exemple - dont les effets positifs avaient été identifiés lors des travaux préalables. Concrètement, dans chacune des régions étudiées, les agriculteurs sollicités ont été sélectionnés par les conseillers de la coopérative pour leur implication dans la recherche d'innovations. Ainsi, la plupart des agriculteurs présents à l'atelier de conception dans le Barrois s'intéressent particulièrement aux techniques de conservation des sols.

Des discussions ont été nécessaires pour analyser la cohérence entre la satisfaction des objectifs assignés aux systèmes de culture alternatifs et les préoccupations des agriculteurs. Pour les cultures qui ne sont pas familières à l'exploitant, des itinéraires types « régionaux » ont pu être mobilisés. Les préoccupations relatives aux systèmes alternatifs ont été hiérarchisées par les agriculteurs comme suit : (1) répondre aux différents enjeux tels qu'ils ont été identifiés collectivement au début de l'atelier, (2) considérer le contexte pédoclimatique de la région agricole, (3) s'assurer qu'il existe bien des débouchés pour les produits cultivés sur le territoire, et (4) maintenir le même niveau de rendement en raisonnant notamment la fertilisation azotée en conséquence. A l'issue de cette étape, il est intéressant de noter différents éléments : (i) les préoccupations associées aux performances économiques et à la maîtrise technique du système ont été beaucoup plus de fois citées par les agriculteurs que celles associées à l'amélioration des conditions de travail ou à la réponse aux attentes de la société, (ii) l'atténuation des impacts des systèmes de culture sur le réchauffement climatique n'a jamais été mentionnée comme préoccupation majeure par les agriculteurs sollicités lors de ces ateliers alors que la baisse du recours aux intrants, la préservation du sol (et les pratiques de l'agriculture de conservation qui y sont associées⁵) étaient clairement exprimées.

La durabilité des systèmes de culture alternatifs (Tableau 3) a été évaluée avec le modèle MASC® et comparée à celles des systèmes de culture actuels (Figure 5). Certains systèmes se révèlent intéressants du point de vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre et donc de la baisse du recours aux énergies fossiles. Par exemple, les systèmes TCSL- Pure dans le Barrois et TCS- asso à Châlons permettent une réduction de 25 à 30% des émissions de CO₂ (calculs effectués avec le logiciel Dia'terre®). D'autres simulations avec MASC® ont permis de prendre en compte les préférences des différents types d'acteurs. Alors que les trois branches de la durabilité (économique, sociale et environnementale) avaient le même poids dans les premières évaluations, le poids relatif de la branche économique a été porté à 60 % pour répondre aux objectifs des agriculteurs puis, dans une dernière série, à 60% pour la branche environnementale. Certains des systèmes, tel le système TCS Asso sur craie, s'avèrent être robustes et assurent la double performance économique et environnementale. Une analyse détaillée montre qu'ils peuvent se révéler complexes à mettre en œuvre et augmenter les temps de travaux (branche sociale de la durabilité).

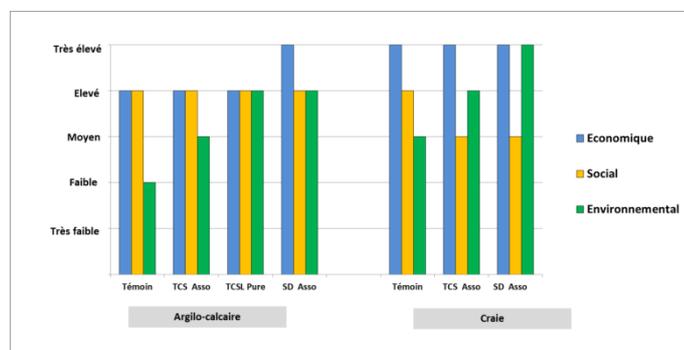


Figure 5 : Évaluation de la durabilité des systèmes innovants co-conçus en comparaison avec les systèmes actuels dans les deux zones d'étude (en argilo-calcaire et en sol de craie). SD : semis direct ; TCS : Techniques Culturelles Simplifiées ; TCSL : Techniques Culturelles sans Labour ; Pure : introduction de cultures intermédiaires ; Asso : introduction de cultures en association et de cultures intermédiaires.

Les principaux enseignements de ce travail sont : (i) le diagnostic effectué sur les systèmes de culture actuels a permis de mettre en évidence leurs atouts et faiblesses, (ii) l'application des principes de l'agriculture de conservation apparaît à travers les systèmes proposés comme une voie prometteuse pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, augmenter la contribution au développement durable des systèmes de production tout en considérant les contraintes et les préoccupations des agriculteurs de cette région, (iii) pour mener ce travail en atelier, il est important de constituer des groupes homogènes tant sur le plan des objectifs poursuivis par les personnes impliquées que sur celui de leur aversion au risque, (iv) étant donnée la faible implication des conseillers dans la conception de systèmes innovants, il pourrait être intéressant dans un premier temps d'animer des ateliers avec eux pour les sensibiliser à la question de la conception innovante mobilisant un outil d'évaluation multicritère, (v) les participants se sont dans l'ensemble dits satisfaits du travail engagé, et (vi) les participants ont insisté sur l'importance de communiquer sur ces travaux auprès de chercheurs, décideurs, conseillers et agriculteurs en veillant à interpréter les résultats avec prudence. L'étape suivante consisterait dans la mise en œuvre de l'évaluation expérimentale des systèmes de culture alternatifs par la coopérative agricole. Cette implémentation est une étape nécessaire pour la bonne compréhension des enjeux ciblés par l'ensemble des acteurs, conseillers agricoles et agriculteurs, et pour le transfert de combinaisons nouvelles de pratiques culturales chez les agriculteurs.

Conclusion

Réduire la consommation d'énergie à l'échelle du système de culture nécessite de profonds changements techniques : changement de cultures, notamment introduction de légumineuses, culture d'associations pluri-spécifiques à la place de cultures pures, réduction des consommations de certains intrants, utilisation de plantes de couverture associées à une réduction du travail du sol. Les différents résultats expérimentaux présentés montrent qu'une réduction d'un tiers environ de la consommation énergétique fossile par rapport à des témoins est possible en combinant ces leviers, sans dégrader (au moins à court terme) d'autres performances environnementales, mais avec des effets variables sur la production – amenant à une efficacité énergétique comparable. Au-delà de la complexité de leur mise en œuvre chez les agriculteurs, de telles évolutions supposent un engage-

⁵ L'agriculture de conservation vise à maintenir et améliorer le potentiel agronomique des sols. Elle repose sur (1) la réduction voire la suppression du travail du sol, (2) l'allongement et/ou la diversification de la rotation culturale et, (3) l'utilisation de couverts végétaux permanents. (FAO, 2008).

ment et un changement des activités de la part de l'ensemble des acteurs des filières agricoles (Meynard *et al.*, 2014). La mobilisation des organismes de collecte, souvent également distributeurs d'intrants, l'évolution du conseil agricole, ainsi que l'évolution de la formation des futurs agriculteurs, sont des conditions nécessaires au déploiement de telles évolutions. La diffusion des connaissances scientifiques et techniques sur la consommation d'énergie liée aux pratiques agricoles serait également bénéfique à une prise de conscience de la dépendance de l'agriculture à cette ressource, celle-ci étant parfois indirecte (cas de la consommation liée aux engrais azotés). Elle permettrait également d'identifier, au sein de chaque exploitation agricole, les postes de consommation majeure et donc les leviers les plus efficaces à mettre en œuvre pour réduire de manière significative la consommation. La mise en œuvre systématique de tels diagnostics pourrait donc être intéressante à proposer par les politiques publiques.

Remerciements

Le projet SYSCLIM a été financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel d'offres REACTIF. Les auteurs remercient vivement Damien Craheix pour ses apports à différentes étapes du travail.

Références

ADEME, 2012. *Analyse économique de la dépendance de l'agriculture à l'énergie : évaluation, analyse rétrospective depuis 1990, scénarios d'évolution à 2020*.

Synthèse I-Care et Céréopa, 6p, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85625_dependance_synthese.pdf.

ADEME, 2014. *Climat, air et énergie. Chiffres-clés*. Angers.

Bockstaller, C., Girardin, P., 2000. Agro-ecological indicators—instruments to assess sustainability in agriculture. In: Härdtlein, M., Kaltschmitt, M., Lewandowski, I., Wurl, H. (Eds.), *Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft. Landwirtschaft im Spannungsfeld Zwischen Ökologie, Ökonomie und Sozialwissenschaft, Initiativen zum Umweltschutz*, Vol. 15. Erich Schmidt Verlag, Stuttgart, pp. 69-83.

Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.B., Gaillard, G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 223-235.

Commissariat Général au Développement Durable, 2016. *Chiffres clés de l'énergie*, Édition 2015. Collection repères, 60 p, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-chiffres-clés-de-l-energie-en.html>.

Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innov. Agron.*, 20, 35-48.

Craheix D., Angevin F., Colnenne-David C., Pelzer E., Torres N., 2014. Design and assessment with farmers of innovative

cropping systems to mitigate climate change and to meet sustainable requirements. in: *Proceedings of the XIIIth congress of the European Society for Agronomy*, 25-29 August 2014, Debrecen, Hungary, 319-320. http://www.esa2014.hu/doc/esa2014_proceedings.pdf.

Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 73-86.

FAO, 2008. *Investing in Sustainable Agricultural Intensification. The Role of Conservation Agriculture. A Framework for Action*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome. http://www.fao.org/ag/ca/doc/proposed_framework.pdf.

Jenkinson, D.S., 2001. The impact of humans on the nitrogen cycle, with focus on temperate agriculture. *Plant Soil*, 228, 3-15.

Jensen, E., Peoples, M., Boddey, R., Gresshoff, P., Hauggaard-Nielsen, H., J.R. Alves, B., Morrison, M., 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 32, 329-364.

Köpke, U., Nemecek, T., 2010. Ecological services of Faba bean. *Field Crops Res.*, 115, 217-233.

Labreuche, J., Lellahi, A., Malaval, C., Germon, J.C., 2011. Impact des techniques culturales sans labour sur le bilan énergétique et le bilan des gaz à effet de serre des systèmes de culture. *Cahiers Agriculture*, 20, 204-215.

Lamotte, P., Martin, J.P., 2014. Consommation d'énergie : les exploitations agricoles consomment majoritairement des produits pétroliers. *Agreste Primeurs*, 311, 4p.

Loyce, C., Wéry, J. 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. *L'agronomie aujourd'hui*, QUAE éditions, Versailles, pp. 77-95.

Markussen, M.V., Østergård, H., 2013. Energy analysis of the food production system: Food-EROI and fossil fuel dependency. *Energies* 6 (8), 4170-4186.

Meynard, J.M., 2012. La reconception est en marche ! Conclusion au Colloque « Vers des systèmes de culture innovants et performants : De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former ». *Innov. Agron.*, 20, 143-153.

Meynard, J.M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.B., Savini, I., Rechauchère, O., 2014. *La diversification des cultures : lever les obstacles agronomiques et économiques*. QUAE Editions, Versailles, 103 p.

Nemecek, T., von Richthofen, J.S., Dubois, G., Casta, P., Charles, R., Pahl, H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *Eur. J. Agron.* 28, 380-393.

Nemecek, T., Hayer, F., Bonnin, E., Carrouée, B., Schneider, A., Vivier, C., 2015. Designing eco-efficient crop rotations using life cycle assessment of crop combinations. *Eur. J. Agron.*, 65, 40-51.

Pelzer, E., 2015. *Agronomic and environmental performances of biomass crops-legume intercropping for biomass production*. EU seventh Framework Programme, LogistEC project No. 311858 (Logistics for Energy Crop Biomass), deliverable D1.7.

Pelletier, N., Audsley, E., Brodt, S., Garnett, T., Henriksson, P., Kendall, A., Kramer, K.J., Murphy, D., Nemecek, T., Troell, M., 2011. Energy intensity of agriculture and food systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 36, 223-246.

Petit, M.S., Reau, R., Dumas, M., Moraine, M., Omon, B., Josse, S., 2012. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil. *Innov. Agron.*, 20, 79-100.

Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., 2009. The potential environmental benefits and risks derived from legumes in rotations. In: Emerich D.W., Krishnan H.B. (Eds) *Agronomy Monograph 52. Nitrogen Fixation in Crop Production*, Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am. and Soil Sci. Soc Am. Madison, Wisconsin, USA, pp 349-385.

Rathke, G.W., Wienhold, B.J., Wilhelm, W.W., Diepenbrock, W., 2007. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil Tillage Res.* 97, 60-70.

Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., and Doré, T., 2009. MASCO, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 447-461.

Smil, V., 2001. *Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press, Cambrid.

Zentner, R.P., Campbell, C.A., Biederbeck, V.O., Miller, P.R., Selles, F., Fernandez, M.R., 2001. In search of a sustainable cropping system for the semiarid Canadian prairies. *J. Sustain. Agric.*, 18, 117-136.

Zentner, R.P., Lafond, G.P., Derksen, D.A., Nagy, C.N., Wall, D.D., May, W.E., 2004. Effects of tillage method and crop rotation on nonrenewable energy use efficiency for a thin Black Chernozem in the Canadian prairies. *Soil Tillage Res.*, 77, 125-136.