



HAL
open science

PSDR4 ProSys - L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines en Bourgogne-Franche-Comté

Marjorie Ubertosi, Thierry Castel, D. de Fornel, Maé Guinet, Daniel Joly, Annabelle Larmure, Eric Lucot, Bernard Nicolardot, M.S. Petit, Wilfried Queyrel, et al.

► To cite this version:

Marjorie Ubertosi, Thierry Castel, D. de Fornel, Maé Guinet, Daniel Joly, et al.. PSDR4 ProSys - L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines en Bourgogne-Franche-Comté. *Innovations Agronomiques*, 2022, 86, pp.173-189. 10.17180/ciag-2022-vol86-art16 . hal-03686545

HAL Id: hal-03686545

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-03686545v1>

Submitted on 2 Jun 2022

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

PSDR4 ProSys - L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines en Bourgogne-Franche-Comté

Ubertosi M.¹, Castel T.², De Fornel D.³, Guinet M.¹, Joly D.⁴, Larmure A.¹, Lucot E.⁵, Nicolardot B.¹, Petit M.S.⁶, Queyrel W.¹, Tanguy C.⁷, Vergote M.H.⁷, Voisin A.S.¹, Lecomte C.¹

¹ UMR Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE Dijon, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne-Franche-Comté, 17 rue Sully, BP 86510, F-21034 Dijon Cedex

² UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ. Bourgogne-Franche-Comté/EPHE, 6 bd Gabriel, F-21000 Dijon

³ Terres Inovia, 1 Les Coulots, F-21110 Bretenière

⁴ UMR 6049 THEMA, CNRS/Univ. Bourgogne-Franche-Comté, 32 rue Mégevand, F-25030 Besançon

⁵ UMR CNRS 6249 Chrono-Environnement, Univ. Franche-Comté, F-25030 Besançon

⁶ Chambre régionale d'Agriculture de Bourgogne-Franche-Comté, 1 rue des Coulots, F-21110 Bretenière

⁷ CESAER, Institut Agro Dijon-INRAE Dijon - Université de Bourgogne-Franche-Comté, 26 Boulevard Dr Petitjean, F- 21000 Dijon

Correspondance : marjorie.ubertosi@agrosupdijon.fr et christophe.lecomte@inrae.fr

Résumé

Le projet PSDR4 ProSys visait à identifier des systèmes de culture à enjeux protéines performants d'un point de vue agronomique, pouvant s'adapter au contexte du changement climatique, répondant aux enjeux environnementaux, économiquement viables et représentant une alternative acceptable pour les exploitants agricoles et les filières. Les potentiels de production et les contraintes environnementales rencontrées par les légumineuses, dans les conditions actuelles et en prospective dans le contexte du changement climatique ont été étudiées. En complément, une expérimentation a été menée afin d'étudier l'effet précédent de différentes espèces de légumineuses. De plus, une traque à l'innovation a permis d'identifier et d'analyser des systèmes de culture producteurs de protéines qui ont été testés par des agriculteurs de la région qui en sont satisfaits. Les impacts environnementaux positifs et l'intérêt pour la production globale de protéines, de systèmes de culture avec légumineuses ont été évalués via des suivis expérimentaux de longue durée. Enfin, les modalités du changement des pratiques d'agriculteurs vers des systèmes producteurs de protéines végétales ont été analysées. La création de groupes de travail avec l'enseignement agricole et les professionnels du monde agricole a permis l'élaboration d'un ensemble d'outils et de supports de communication valorisant les résultats du programme.

Mots-clés : Protéines végétales, Systèmes de culture, Production durable, Adaptation aux changements, Outils pédagogiques.

Abstract: PSDR4 ProSys - Pedoclimatic adaptation, environmental impacts and economic value of new sustainable protein-producing cropping systems in Burgundy-Franche-Comté

The ProSys project aimed to identify agronomically efficient protein-based cropping systems that can adapt to the context of climate change, meet environmental challenges, are economically viable and represent an acceptable alternative for farmers and the industry. The potential of production and environmental constraints encountered by legumes, under current conditions and in the context of climate change, were studied. In addition, an experiment was conducted to study the previous effect of different legume species. An innovation tracking has allowed to identify and analyze protein-producing cropping

systems that have been tested by farmers in the region who are satisfied with them. The positive environmental impacts and the interest for the global production of proteins of cropping systems with legumes were evaluated through long-term experimental follow-ups. Finally, the modalities of changing farmers' practices towards plant protein producing systems were analyzed. The creation of working groups with agricultural education and professionals from the agricultural world has enabled the development of a set of tools and communication media to promote the results of the program.

Keywords: Plant proteins, Cropping systems, Sustainable production, Adaptation to changes, Educational tools.

Introduction

L'intensification agricole amorcée depuis les années 1950 a conduit au modèle dominant actuel caractérisé par des systèmes de production de grandes cultures et de polyculture-élevage reposant sur l'utilisation d'engrais de synthèse et le choix d'espèces cultivées assurant la meilleure rentabilité à court terme. Ceci a conduit à l'abandon d'espèces moins productives (comme les légumineuses), au profit du blé et du colza (Schott *et al.*, 2010), à une perte d'autonomie en protéines d'origine végétale et à des problèmes phytosanitaires et environnementaux croissants. Aujourd'hui, les dérèglements climatiques et l'appauvrissement des ressources questionnent la durabilité de ce modèle (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) et se pose donc le défi d'une production de protéines plus autonome, performante et durable dans ce contexte. Ces changements de pratiques sont au cœur des questions de recherche. Il en résulte : 1) dans les domaines biotechniques, des questions autour de la faisabilité technique et de la cohérence agronomique pour la réintroduction des légumineuses dans les systèmes de cultures, 2) en sciences humaines et sociales, l'analyse des verrous socio-techniques, matérialisés par la faible intégration de légumineuses dans les assolements (Meynard *et al.*, 2013 ; Parlement européen, 2011). Des questions se posent également dans le domaine de la pédagogie en lien avec le développement de l'agroécologie, plus particulièrement dans le cadre de la démarche *Enseigner à produire autrement* de l'enseignement agricole.

En Bourgogne-Franche-Comté, une grande activité de polyculture et d'élevage est conduite, se répartissant sur terres arables (50,8% SAU) et prairies permanentes (46,7% SAU) (2019). La prairie est essentiellement utilisée pour des productions bovines de lait et viande. La rotation colza-blé-orge est encore dominante dans les assolements des grandes cultures, où très peu de légumineuses sont présentes. Les protéines végétales locales sont donc principalement issues des fourrages et des grandes cultures. Ainsi, la question de développer la production des protéines végétales dans les systèmes de culture de la région Bourgogne-Franche-Comté, via notamment l'intégration des légumineuses dans les prairies ou en grandes cultures pour améliorer la durabilité des systèmes et augmenter l'autonomie en protéines à différentes échelles, devient pertinente. Le projet ProSys (PSDR4) avait pour objectif de produire des connaissances nouvelles (sur les potentiels et facteurs limitants de la production, et leur évolution à venir, la fourniture d'azote, les impacts environnementaux des systèmes de culture avec légumineuses), d'étudier sur les plans agronomique, économique et environnemental des systèmes de culture expérimentaux ou ayant été testés par des agriculteurs, et d'analyser des conditions permettant leur adoption à une plus large échelle.

1. Territoires étudiés et méthodes mises en œuvre

1.1 Présentation des terrains

Le territoire étudié est celui de la région Bourgogne Franche-Comté. Ainsi plusieurs approches ont été menées à cette échelle : des cartes d'indicateurs climatiques ou des approches économétriques ont été réalisées sur le territoire dans sa totalité. La traque à l'innovation a couvert une diversité de systèmes de

cultures incluant des légumineuses en place sur la zone afin de décrypter les logiques d'insertion dans les systèmes de culture et de production (en grandes cultures et en polyculture-élevage). Ils étaient localisés dans l'Yonne, la Haute-Saône, la Saône-et-Loire, le Doubs et le territoire de Belfort. Les agriculteurs et les acteurs de la filière enquêtés pour identifier les freins et leviers aux changements de pratiques agricoles ont été choisis en fonction des questions traitées : rôle des collectifs, enjeux lié à la filière... puis l'analyse des enquêtes a été complétée par des données obtenues par l'équipe de l'ISARA-Lyon dans l'ANR Legitimes sur le plateau du sud-Yonne et nord Côte-d'Or.

En parallèle, les expérimentations au champ et les données biotechniques recueillies dans des parcelles agricoles chez des agriculteurs étaient réparties sur l'ensemble de la région. Le domaine expérimental de l'INRAE à Bretenière (21) a servi de support à plusieurs essais, et des parcelles du réseau d'agriculteurs des chambres d'agriculture, des exploitations de plusieurs lycées agricoles, des données expérimentales obtenues à l'ISARA de Lyon en nord-Isère, Ain et Jura, deux parcelles suivies à Virey-le-Grand (71) et à Migé (89) et des parcelles du bassin versant de la Loue (25) ont complété le dispositif expérimental.

1.2 Approches scientifiques et techniques

Le projet visait à identifier des systèmes de culture à enjeux protéines performants d'un point de vue agronomique, pouvant s'adapter au contexte du changement climatique, répondant aux enjeux environnementaux, économiquement viables et représentant une alternative acceptable pour les exploitants agricoles et les filières. Cette problématique impliquait de rassembler des agronomes, des écophysiologistes, des généticiens, des pédologues, des climatologues, des économistes et des sociologues. Ces compétences ont été rassemblées dans le collectif de chercheurs et d'acteurs.

Le réseau d'acteurs et de chercheurs mobilisés avaient déjà acquis de nombreuses données en lien avec la problématique développée. Une première étape a donc été de repérer l'ensemble des acteurs et chercheurs possédant des données déjà existantes. Ainsi plusieurs projets de recherche comme le projet PSDR-3 "Profile", le projet CASDAR pois-colza-blé, l'ANR Legitimes ont permis de contribuer à l'acquisition de données que nous avons pu valoriser. La DRAAF BFC, les Chambres d'Agriculture, Terres-Inovia et les coopératives possèdent également des données qui ont été utilisées dans le projet. De plus, plusieurs bases de données ont été mobilisées comme les données DONESOL des Référentiels Régionaux Pédologiques Bourgogne et Franche-Comté, le référentiel parcellaire graphique (RPG), les données de la statistique agricole (service SRISE de la DRAAF), les données climatiques SIM (SAFRAN-Isba-Modcou de Météo-France ; Quintana-Seguí *et al.*, 2008) ainsi que des données climatiques simulées produites dans le cadre de l'ANR CoSAC (<https://www.projet-cosac.fr/Presentation> – Cavan *et al.*, 2020).

Des enquêtes qualitatives dans le cadre d'entretiens semi-directifs ont également été réalisées, auprès d'agriculteurs mais aussi d'acteurs de la filière. Le travail s'est déroulé en deux grandes étapes : une première étape exploratoire, conduite grâce à des projets d'étudiants de l'ISARA de Lyon et d'AgroSup Dijon, puis une étape d'approfondissement des hypothèses issues de l'étape exploratoire avec des études de cas. Les enquêtes ont été conduites sur un échantillon représentatif de la diversité des profils d'agriculteurs et d'exploitations en BFC, et construit par la méthode boule de neige (Mitchell *et al.*, 1997). Une analyse économétrique à partir des données de contexte pédoclimatique (type de sol, température, précipitations...) et des données de contexte agro-industriel (localisation des usines de transformation, des bassins de collecte des coopératives, densité de l'élevage...) a également été menée en début de projet.

La dernière approche mobilisée est la modélisation. Dans les différentes tâches, plusieurs modèles ont été utilisés. Ces modèles ont permis de synthétiser et de mettre en lien les données expérimentales, et également d'évaluer et de réaliser des projections selon différents scénarii. Le modèle de culture Azodyn-Pea (Jeuffroy *et al.*, 2012 ; Larmure *et al.*, 2017) a été amélioré, en lien avec le projet PIA PeaMUST, et

incrémenté sur la plateforme Record de l'INRAE. Des données permettant un développement futur du modèle Azodyn pour la féverole ont également été acquises. Le modèle de culture STICS (Brisson *et al.*, 2003) a été utilisé pour simuler les flux d'azote générés par 10 espèces de légumineuses. Les données issues des enquêtes ont été traitées à l'aide de modèle d'évaluation multicritère. Enfin les climatologues utilisent le modèle climatique régional ARW/WRF (Skamarock *et al.*, 2008) afin de simuler le climat régional pour le passé récent et pour le futur.

2. Résultats

2.1 Changement climatique : risques et adaptations chez le pois d'hiver

Des simulations climatiques régionales nous ont permis d'estimer les caractéristiques possibles du climat au cours du 21ème siècle en Bourgogne-Franche-Comté. Pour produire des données climatiques quotidiennes à une maille de 8 km x 8 km, un protocole de descente d'échelle appelé « désagrégation dynamique » a été construit. Le climat est simulé par un modèle climatique à aire géographique limitée ARW/WRF (Skamarock *et al.*, 2008). Un premier jeu de données climatiques (Dee *et al.*, 2011) a permis de valider le protocole sur la période dite historique (1980-2016 : Brulebois *et al.*, 2017 ; Cavan *et al.* ; 2020), puis le modèle a été forcé avec des projections climatiques selon deux trajectoires du GIECC : les RCP 4.5 et 8.5 (Representative Concentration Pathway), conduisant respectivement à une augmentation des températures moyennes annuelles terrestres de l'ordre de 2 et 4°C d'ici à 2100. (Bruyère *et al.*, 2014 ; Taylor *et al.*, 2011).

Les données simulées de températures journalières (Tmin et Tmax) en combinaison avec deux modèles agronomiques ont permis d'évaluer l'évolution du stress gel hivernal et de la date de floraison chez le pois (*Pisum sativum* L.) en Bourgogne-Franche-Comté pour le futur proche (2017-2049) et le futur lointain (2050-2100).

Les dégâts de gel hivernal (Figure 1) ont été estimés à partir du modèle de Lecomte *et al.* (2003) adapté au pois, dans lequel la température de résistance effective de la culture au gel est calculée chaque jour en tenant compte de la variété (caractérisée par un seuil de résistance maximale et une durée d'acclimatation), de la date de semis et du régime de températures auquel les plantes sont soumises. Il y a stress gel lorsque la température minimale journalière est inférieure à la température de résistance effective au gel de la culture. Sur l'ensemble de la période hivernale, le modèle calcule un indice de stress gel exprimé en degrés-jours (°C.j), qui correspond au cumul des intensités de stress gel journalier. Il a été montré que cet indice de stress gel était significativement corrélé aux dégâts de gel observés sur la culture (Castel *et al.*, 2017). Les simulations indiquent que l'intensité du gel ne diminue pas jusqu'en 2050, même pour le régime de réchauffement le plus rapide (RCP 8.5) (Figure 1). Une diminution apparaît après 2050, et elle est plus importante pour le scénario de réchauffement le plus rapide. L'intensité des dégâts diminue, mais avec une grande variabilité interannuelle et des risques de dégâts plus marqués pour les variétés à faible résistance maximale. Des travaux précédents ont montré que l'intensité des dégâts de gel a diminué dans le passé mais que le nombre de jours avec des dégâts a augmenté (Castel *et al.*, 2017 ; 2019). Les plantes, pour résister au gel, ont besoin de s'acclimater. Les automnes et hivers plus doux empêchent cette acclimatation, et lorsque des coups de gel apparaissent, même s'ils sont de faible intensité, ils sont susceptibles d'entraîner des dégâts. Ainsi il est souhaitable de proposer et conserver jusqu'en 2050 environ des variétés de pois avec une bonne température de résistance maximale au gel et une durée d'acclimatation courte.

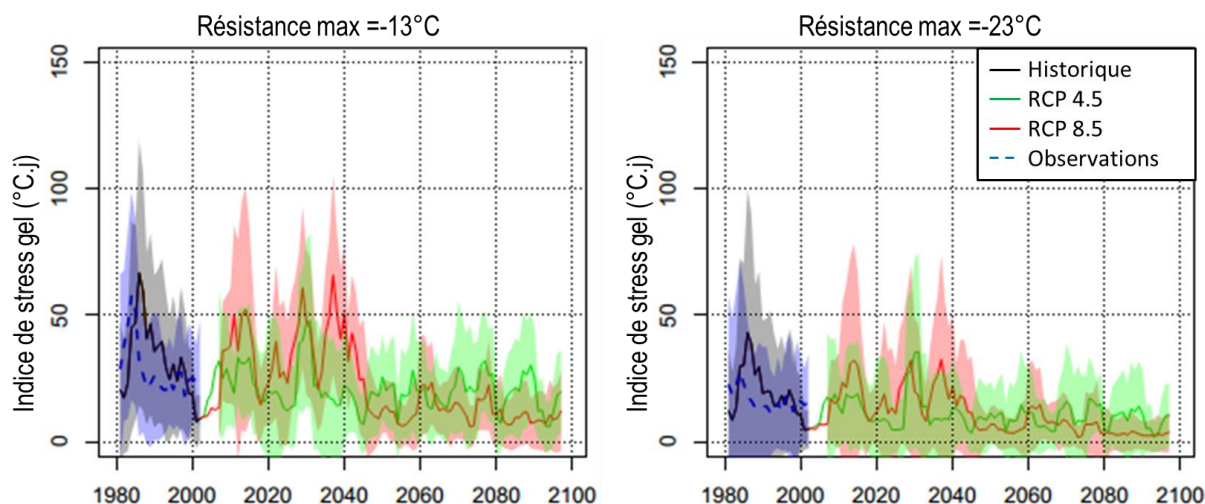


Figure 1 : Evolution de l'intensité des dégâts de gel hivernal (Indice de stress gel), pour deux températures de résistance maximale variétale (-13°C et -23°C), pour plusieurs dates de semis (2, 10, 21 et 31 octobre) et plusieurs durées d'acclimatation (35 à 49 jours par pas de 2 jours). Le stress gel hivernal est évalué pour chaque hiver par la somme des différences entre la température de résistance effective journalière de la culture calculée par le modèle et la température minimale quand celle-ci est inférieure à la résistance. Évolution moyenne (en trait plein) et enveloppes des simulations réalisées en utilisant les données observées et les données simulées : période historique (1980-2003) et futures 2017-2049 et 2050-2100 selon les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (Van Vuuren *et al.*, 2011).

De plus, l'évolution de la date de début floraison a été simulée à l'aide d'un modèle agronomique qui utilise la somme de températures depuis le semis et la photopériode (durée du jour) (Quinio, 2015), validé à l'aide de données expérimentales (CTPS "Pois d'hiver" 2007-2009, PIA PeaMUST 2012-2020). L'avancée du stade floraison entre la période actuelle et le futur lointain (2050-2100) sera de l'ordre de 2 semaines en moyenne pour le pois d'hiver (Isard), et environ 3 semaines sur les reliefs. En conséquence, sur cet aspect aussi il faudra s'adapter, soit en retardant les dates de semis à l'automne pour éviter des stades initiation florale trop précoces en sortie d'hiver, soit en utilisant des variétés dont la date de floraison est déterminée par la photopériode.

Si l'on prend en compte tout le cycle de la culture et l'ensemble des variables climatiques, on voit que c'est tout le système culture-variété-interventions culturales qui doit être repensé. Un modèle de culture représentant plus globalement le fonctionnement de la culture de pois et l'impact des stress climatiques est en cours d'utilisation pour tester des pistes d'adaptation à l'évolution du climat (Larmure *et al.*, 2017).

2.2 Gestion des intrants : Intérêt des légumineuses et risques

Les légumineuses ont la particularité de fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des bactéries du sol. Comme toutes les autres espèces, elles ont également la capacité d'absorber l'azote minéral du sol, lorsque celui-ci est accessible à leurs racines. La mise en place de la symbiose, plus coûteuse en énergie au sein d'organes spécifiques (les nodosités), intervient lorsque ce stock d'azote minéral du sol est épuisé, avec des capacités différentes entre légumineuses (Guinet *et al.*, 2018).

Des expérimentations réalisées en 2014 et 2016 sur l'unité expérimentale d'INRAE à Bretenière (21) ont permis de comparer la quantité d'azote accumulée par 10 espèces de légumineuses à graines et de déterminer l'origine de cet azote (azote de l'air et azote minéral du sol) puis d'étudier l'effet précédent sur une culture de blé non fertilisée implantée à la suite (en 2015 et 2017). 6 espèces ont été semées en mars (le fenugrec, le lupin, la féverole, le pois, la lentille et la vesce commune) et 4 en mai (le soja, le haricot, le pois chiche et la vesce de Narbonne). Deux céréales ont été semées comme témoin : de l'orge

de printemps pour le semis de mars et du sorgho pour le semis de mai. L'orge et le sorgho ont été fertilisés de manière raisonnée. A cause de conditions climatiques défavorables, aucune récolte de graines n'a été possible pour le pois chiche et la vesce de Narbonne en 2014.

La quantité d'azote totale fixée a été en moyenne de 129 kg N/ha pour les deux années toutes espèces confondues, avec des valeurs comprises entre 60 kg N/ha pour la vesce de Narbonne en 2014 et 344 kg N/ha pour la féverole en 2016. La part de l'azote provenant de la fixation symbiotique a été de l'ordre de 70 % pour la majorité des espèces mais il y a des espèces à fort taux de fixation (féverole, lupin : 78 %) et d'autres à faible taux de fixation (haricot et vesce de Narbonne : 60 %) (Figure 2a). A la récolte, les teneurs en protéines des graines diffèrent entre espèces avec des teneurs allant de 18 % pour la vesce commune jusqu'à 42 % pour le soja.

Pour le blé cultivé après des légumineuses semées en mars, les quantités d'azote retrouvées étaient en moyenne respectivement de 64.4 et 74.8 kg N/ha en 2015 et 2017. Ces valeurs sont supérieures à celles du précédent orge (60.3 et 54.3 kg N/ha en 2015 et 2017). Les valeurs les plus élevées ont été obtenues après les précédents lentille et féverole. Pour le blé cultivé après les légumineuses semées en mai, les quantités d'azote retrouvées dans le blé étaient en moyenne respectivement de 66.9 et 65.6 kg N/ha en 2015 et 2017. Ces valeurs sont supérieures au précédent sorgho (45.8 et 45.5 kg N/ha en 2015 et 2017) (Figure 2b). Les quantités d'azote disponible pour le blé ont été fonction des quantités d'azote minéral présent dans le sol, additionnées des quantités d'azote minéralisé à partir des résidus de légumineuses. Cette capacité de minéralisation est influencée par le rapport C/N et la composition biochimique des résidus des différentes espèces (Guinet *et al.*, 2020).

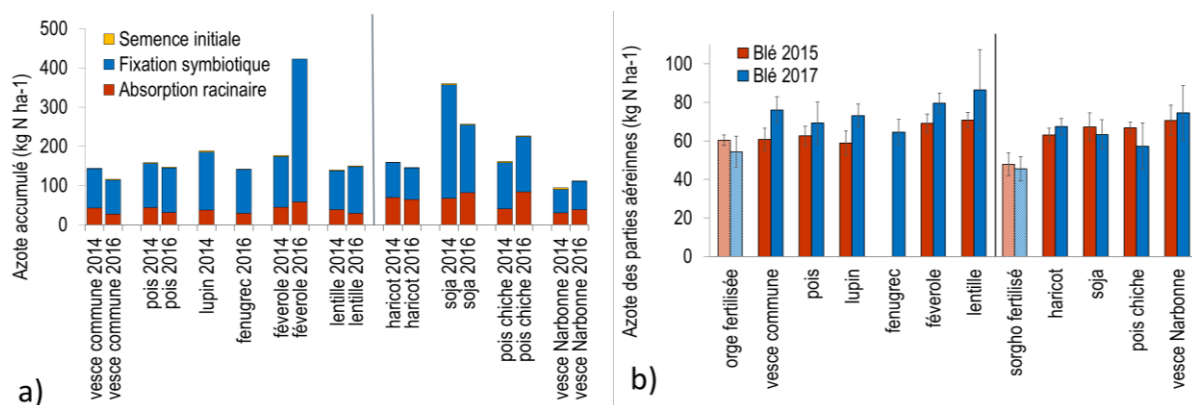


Figure 2 : (a) Origine de l'azote accumulé par les différentes espèces en 2014 et 2016 (Guinet *et al.*, 2018). (b) Quantités d'azote présentes dans les parties aériennes à la récolte du blé en 2015 et 2017 en fonction de la culture précédente (Guinet *et al.*, 2020). Légumineuses ou céréale de référence semées en mars (à gauche du trait) ou semées en mai (à droite du trait).

Les différents résultats obtenus dans ProSys confortent l'intérêt de l'introduction de légumineuses en grandes cultures et en polyculture élevage. Toutefois, l'analyse croisée des résultats de quatre expérimentations longue durée où l'impact de systèmes de culture sur la qualité des eaux a été évalué, dans des situations pédoclimatiques contrastées, montre que parfois la durabilité de ces systèmes peut être réinterrogée au regard de leurs impacts négatifs potentiels sur la qualité de l'eau (Ubertosi *et al.*, 2020). L'introduction de légumineuses dans les rotations peut permettre la réduction des intrants azotés et phytosanitaires et par conséquent la diminution des pressions sur les masses d'eau. Mais dans certaines circonstances, comme le retournement de prairie temporaire ou de luzerne, ou la reprise de travail du sol après une conduite en semis direct sous couvert, il est observé une importante lixiviation des nitrates, parfois jusqu'à 18 mois après le labour (Justes *et al.*, 2001 ; Vertes *et al.*, 2010) (Figure 3).

Concernant la dynamique des produits phytosanitaires, les résultats des expérimentations ne permettent pas de tirer des conclusions claires. Il semble que les risques soient surtout présents les semaines suivant l'application de produits, quelle que soit la culture (légumineuses ou céréales) et que la réduction des usages se traduit par une réduction des substances phytosanitaires retrouvées dans les eaux (Figure 3). Toutefois, l'introduction de ces cultures dans les rotations, est souvent associée à l'introduction de nouvelles molécules phytosanitaires. Les effets croisés et effets dits « cocktail » sur les compartiments de l'environnement (air, sol, eau, biodiversité) de cette diversification des substances employées au champ, est encore aujourd'hui assez méconnue.

Ainsi la conduite de ces systèmes et la maîtrise de leurs impacts environnementaux, plus particulièrement sur le compartiment eau, est un point de vigilance à avoir surtout dans un contexte de changement climatique. En effet, l'augmentation des températures va impacter les dynamiques de minéralisation de la matière organique des sols. La redistribution prédite des pluies et l'allongement des périodes de sec à la fin du printemps et en été pourraient favoriser ces lixiviations de nitrates en diminuant la lame d'eau drainée et en augmentant l'azote disponible dans les sols à l'automne, période la plus à risque entraînant ainsi une augmentation des concentrations en nitrates dans les masses d'eau.

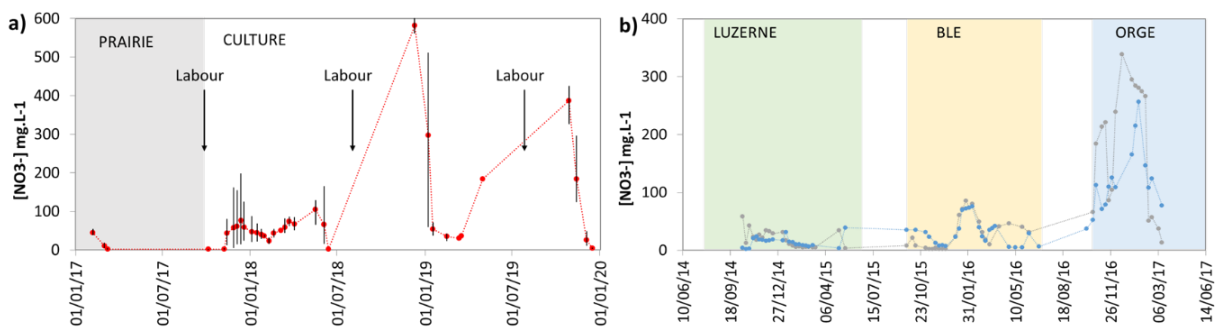


Figure 3 : Dynamique de la concentration en azote de l'eau des lysimètres : (a) sols profonds du bassin versant de Plaisir-Fontaine (71) ; (b) parcelle conduite sans herbicide, site expérimental INRAE de Bretenière (21).

2.3 Motivations pour l'introduction de légumineuses dans les systèmes de culture et évaluation des performances de ces systèmes

L'introduction de légumineuses contribue à la diversification des systèmes de culture actuels et à la fourniture d'azote. Ces espèces représentent ainsi un pilier des systèmes de culture agroécologiques s'appuyant sur la complémentarité des fonctions qu'elles délivrent avec les autres espèces et des services écosystémiques qui en découlent (Köpke et Nemecek, 2010 ; Tibi et Therond, 2017).

Mais, malgré les bénéfices reconnus aux cultures de légumineuses, ces espèces sont aujourd'hui très peu représentées dans les systèmes de culture actuels (Magrini *et al.*, 2016), elles restent des cultures mineures sur lesquelles peu d'investissements ont été consentis tout au long de la filière (Meynard *et al.*, 2013). Ceci s'explique par un certain nombre de freins, parmi lesquels un rendement plus faible que celui des céréales, un manque de solutions de lutte contre les bio agresseurs, et un manque de conseil et de références techniques.

Pourtant, certains agriculteurs continuent à cultiver des légumineuses et en sont satisfaits. Les agriculteurs constituent ainsi une source de solutions innovantes que nous avons cherché à identifier. Un repérage (traque à l'innovation) et une analyse de systèmes mis en œuvre par des agriculteurs intégrant des légumineuses de manière réussie et satisfaisante ont été mis en œuvre, afin d'identifier les motivations des agriculteurs pour recourir aux légumineuses, recenser les différents modes d'insertion en fonction des services visés, et évaluer les performances des systèmes mis en place. Ce travail a été réalisé en différentes phases successives auprès de conseillers et d'agriculteurs de Bourgogne-Franche-

Comté, pour repérer les innovations techniques, systémiques ou organisationnelles conçues par des agriculteurs, à partir d'un cahier des charges de ce que l'on recherche, pour les caractériser sous forme de pratiques cohérentes, évaluer leurs performances agronomiques, économiques et environnementales, et préciser et formaliser les conditions de réussite (Salembier et Meynard, 2013 ; Salembier *et al.*, 2016).

Les résultats des enquêtes ont mis en évidence 11 systèmes de culture différents regroupant 6 modes d'insertion des légumineuses : prairie temporaire, méteil, légumineuses à graines, couvert d'interculture, couvert permanent et plante compagne (Tableau 1). Parmi les systèmes recensés, 33 occurrences d'insertion de légumineuses ont été repérées. Les services les plus souvent observés par les agriculteurs lors de l'insertion de légumineuses dans leurs systèmes de culture sont l'augmentation de l'autonomie en protéines des exploitations agricoles, l'amélioration de la structure du sol, l'apport d'azote au sol, la régulation des adventices et encore l'apport de matière organique dans le sol. Ces résultats illustrent la diversité des possibilités d'insertion des légumineuses et des services associés. En polyculture-élevage, l'augmentation de l'autonomie en protéines de l'exploitation constitue le premier service fourni par les légumineuses, majoritairement par des prairies à base de légumineuses et de méteils. Les plantes compagnes et couverts (temporaires ou permanents) sont ponctuellement valorisés pour l'alimentation des troupeaux. En revanche, les légumineuses à graines sont destinées essentiellement à la vente en polyculture élevage et en grandes cultures. L'insertion de légumineuses à graines permet d'introduire de l'azote dans les systèmes tout en réduisant le recours aux fertilisants azotés. L'insertion de légumineuses dans les méteils ou les couverts d'interculture contribue à la gestion des adventices (sauf en cas de mauvaises implantations et de faible développement).

Tableau 1: Services observés par des agriculteurs lors de l'insertion des légumineuses dans les systèmes de culture (vert : nombre important, jaune : nombre modéré, rouge : nombre faible d'occurrences du service observé par type d'insertion de légumineuses).

Services observés	Prairie temporaire (7)	Méteil (8)	Légumineuses à graine (6)	Couvert d'interculture (7)	Couvert permanent (3)	Plante compagne (2)
Augmenter l'autonomie protéique de l'exploitation agricole	7	8		2	2	
Production de biens agricoles			6			
Répartition du temps de travail		4	1			
Réduction de la fertilisation azotée	5	1	6		1	1
Limiter la pollution de l'eau (azote, produits phytosanitaires)		3		1		
Réduction des IFT (Indice de Fréquence de Traitements)	2	3	2		2	
Gestion de la ressource en eau		5				
Limiter l'érosion	2	2		3		
Améliorer la structure du sol	4	6	1	7	3	1
Limiter la battance				1		
Apport de matière organique au sol (favoriser la vie du sol)		1	1	7	1	1
Apport d'azote au sol		2		4	2	1
Régulation des adventices	6	7		5	3	1
Régulation des maladies			1	1	2	1
Régulation des ravageurs						2
Traçabilité des aliments		1				
Santé des animaux	1	2			2	

Par ailleurs, notre analyse a permis de montrer que les indices de fréquence de traitement (IFT) des systèmes avec légumineuses sont inférieurs (0,8 à 4,2) à ceux des systèmes de référence (4 à 6,7). Le coût énergétique des systèmes avec légumineuses est en moyenne plus faible (10,2 GJ/ha) en comparaison avec les systèmes de référence (12,6 GJ/ha) qui ont, de plus, une variabilité importante (6,1 à 14 GJ/ha). Une analyse du raisonnement agronomique associé à ces retours d'expériences a permis de relever les conditions d'obtention de services satisfaisants et de les extrapoler à d'autres situations. Ces exemples de cultures réussies basées sur des cas concrets sont regroupés dans des livrets et pourront servir de source d'inspiration pour la conception de systèmes incluant des légumineuses par d'autres agriculteurs (Guinet *et al.*, 2021).

2.4 Rôle des collectifs dans la transition agroécologique

En polyculture-élevage les légumineuses fourragères sont régulièrement cultivées et intégrées aux rations. Les services écosystémiques rendus par les légumineuses ont permis la banalisation de l'utilisation de ces cultures en agriculture biologique. En grandes cultures, l'introduction de légumineuses dans les rotations est moins répandue. Pour comprendre les déterminants de ces choix, des enquêtes ont été réalisées auprès d'agriculteurs cultivant des légumineuses (Garcia, 2008), en particulier auprès d'agriculteurs inscrits dans des collectifs à vocation technique. Il s'avère que dès les années 1950, les collectifs ont constitué le fer de lance de la modernisation agricole (Gerbaux et Muller, 1984) et il est établi que l'insertion de nouvelles cultures nécessite une phase d'apprentissage facilitée par l'échange entre pairs (Rivaud et Mathé, 2011). Le choix des collectifs enquêtés s'est fait en concertation avec les acteurs du territoire (chambre d'agriculture, coopératives et DRAAF).

L'analyse des entretiens fait ressortir les apports cognitifs et sociaux des collectifs dans la démarche de diversification. Pour commencer, « sortir des sentiers battus » en s'initiant à de nouvelles cultures révèle une posture pionnière, une recherche d'autonomie, en rupture avec le système d'organisation en place, reposant sur un conseil technique qui diffuse des connaissances élaborées par des experts extérieurs à l'exploitation agricole. Les agriculteurs rencontrés sont dans une démarche de recherche et d'apprentissage et participent aux collectifs dans le but de partager, aller chercher ou construire des connaissances et savoir-faire *ad hoc*. Ils ne sont pas fermés au conseil, cependant ils l'analysent comme une ressource parmi d'autres ressources informationnelles, afin d'élaborer leur propre appréciation de ce qu'il serait pertinent de faire sur leurs parcelles (Vergote *et al.*, 2019).

Les collectifs sont également un lieu de socialisation professionnelle : ils permettent à leurs membres de ne pas se retrouver seul face à leurs difficultés et de progresser plus rapidement par l'agrégation des expériences partagées ; ils procurent de la convivialité dans un métier exercé le plus souvent seul ; ils génèrent également une légitimité, pour oser ensemble et s'écarter du régime technique existant.

En matière de transition agroécologique, les collectifs se présentent ainsi comme un véritable support, un outil de mise en œuvre d'innovations. Toutefois, le choix de nouvelles cultures et l'appropriation de nouvelles pratiques agricoles résultent aussi d'un cheminement individuel, d'une trajectoire personnelle suite à un élément déclencheur. Parmi les agriculteurs rencontrés, cet engagement peut être un choix délibéré par esprit d'innovation, il peut aussi résulter du besoin de trouver des solutions face à des difficultés particulières, voire des impasses (une résistance aux insecticides ou aux herbicides, des surcoûts liés à la sur-application des traitements, des rendements en baisse). Il peut également être le fruit d'un heureux hasard (Carnoye *et al.*, 2019). Aujourd'hui, les collectifs de pairs n'engagent qu'une minorité d'agriculteurs. Ce n'est pas forcément un problème si ces agriculteurs ont un rôle de « gatekeepers » ou « déverrouilleurs de porte » (Polge et Torre, 2015), c'est-à-dire s'ils jouissent d'une reconnaissance par leurs pairs en tant que professionnels que l'on cherche à imiter. Au-delà de la nécessaire réussite agronomique qui valorisera leur démarche, une reconnaissance socio-économique et institutionnelle de leurs apports est primordiale. La labellisation Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental (GIEE) est un exemple de valorisation institutionnelle. Mais l'enjeu de reconnaissance qui ressort également pour qu'un nombre croissant d'agriculteurs s'intéressent et s'initient à des travaux en collectif, est celui d'une meilleure valorisation économique des productions issues de ces pratiques et démarches agroécologiques, reconnues comme vertueuses.

3. Contribution au développement régional et territorial

Le programme PSDR3, focalisé sur les légumineuses à graines, avait permis de développer une connaissance mutuelle et des collaborations entre acteurs bourguignons qui se connaissaient peu. Des travaux communs ont été poursuivis depuis (travaux sur le changement climatique ayant donné lieu à plusieurs publications et interventions devant des professionnels du monde agricole ; communications

des chercheurs lors de journées portes ouvertes Damier Vert, Tech'n Bio...) sur l'intérêt des légumineuses et les techniques culturales à adopter pour ces cultures. Ce programme a contribué à la diffusion de connaissances sur les protéagineux et au test de ces cultures chez des agriculteurs et dans des fermes expérimentales. Des références chiffrées sur l'intérêt économique et environnemental des protéagineux ont été collectées et publiées, permettant d'éclairer les pouvoirs publics sur un certain nombre de mesures qui pourraient être prises pour favoriser ces cultures.

En 2015, l'aide à la structuration de filières végétales et animales en région Bourgogne, par une offre et des usages innovants, durables et plus autonomes de protéines, était au cœur des préoccupations régionales. Suite à la fusion des deux régions initiales de Bourgogne et de Franche-Comté, un nécessaire audit des filières à l'échelle régionale a également renforcé le besoin de traiter les problématiques autour de la production de protéines végétales. La Chambre Régionale d'Agriculture a été alors mandatée pour structurer un réseau regroupant les principaux acteurs en région. Le Groupe Opérationnel Proteins a ainsi vu le jour.

Le projet PSDR4 ProSys s'est donc déroulé dans ce contexte régional favorable aux thématiques portées : adaptation pédoclimatique, impacts environnementaux positifs et valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines. Les contrats de filière pour les filières grandes cultures, porcs, bovins-lait standard et bovins-viande, signés en région en novembre 2018, mettent en évidence le besoin de produire des protéines végétales de qualité en BFC. La réussite de ces engagements passe par le renforcement de la performance des exploitations et de la résilience des systèmes, la sécurisation et le développement de l'autonomie alimentaire, mais également par une animation de la filière et le partage de références scientifiques et techniques.

Le projet a eu pour ambition d'établir un panorama complet des données et références disponibles parmi tous les acteurs, et de leur donner des moyens objectifs pour évaluer les systèmes de culture dans une optique d'augmenter les teneurs en protéines à l'échelle d'une culture et de la rotation, tout en préservant la durabilité des systèmes (au plan économique et environnemental). Les conseillers agricoles, les enseignants, sont demandeurs de références techniques et d'outils pour développer une réflexion sur l'adoption de nouveaux systèmes de culture pour la production de protéines végétales. Le collectif mis en place pour ce projet est un cadre approprié pour favoriser cette transmission de connaissances et susciter l'innovation.

La tâche de valorisation a débuté dès le début du projet avec la création d'un collectif de chercheurs, d'enseignants-chercheurs, d'enseignants de lycées agricoles et d'acteurs du monde agricole. Les travaux sur le changement climatique et son adaptation, les travaux sur les systèmes de culture intégrant des légumineuses ont été diffusés et partagés au fur et à mesure de leur acquisition, notamment à travers des forums, séminaires et réunions de travail. Les enseignants des lycées de BFC se sont fortement impliqués dès le début du programme, participant activement à la construction de la démarche de valorisation et en étant force de proposition sur des évolutions possibles comme l'accueil d'expérimentations sur les parcelles des lycées. Du côté des professionnels, la dynamique a été plus complexe à animer et le collectif mobilisé a souvent été « Dijon centré ».

Enfin, l'analyse des moteurs et freins aux changements chez les agriculteurs a apporté des informations indispensables pour le choix de politiques publiques pour une orientation des productions vers davantage de durabilité économique et environnementale, et une plus grande autonomie protéique des territoires et productions couverts par le projet. Dans ce contexte, le projet ProSys a apporté sa pierre à l'édifice.

4. Discussion

La confrontation des ambitions initiales du projet aux résultats finaux montre une grande cohérence. De nombreux objectifs ont été atteints : les modélisations climatiques régionalisées ont permis l'étude des impacts climatiques sur la culture du pois, des données sur les services écosystémiques rendus par 10

espèces de légumineuses ont été produites et des systèmes de culture répondant aux objectifs fixés ont été identifiés et étudiés.

Toutefois, certains objectifs n'ont été que partiellement atteints ou n'ont pas été atteints. Le potentiel de production dans un contexte de climat futur devait être étudié sur plusieurs espèces légumineuses. Malheureusement, les modèles écophysiologicals n'ont pas pu être développés sur d'autres espèces que le pois pendant la durée du projet. De plus, des résultats des expérimentations au champ déjà en place en région (réseau Artemis des Coopératives, réseau des Chambres d'Agriculture, fermes Dephy...) devaient être exploités et analysés pour améliorer le catalogue de références locales. Des ateliers de co-conception devaient avoir lieu avec les professionnels : ces ateliers ont été expérimentés par les chercheurs du projet dans le cadre d'autres projets de recherche mais n'ont pas pu être mis en œuvre dans notre projet. Toutefois cet aspect "Valorisation auprès des professionnels du monde agricole" : conseillers, animateurs et agriculteurs, est un objectif du Groupe Opérationnel Protéines animé par la CRA, dans lequel le PSDR4 est partie prenante. Les chercheurs et acteurs du projet ProSys poursuivront donc cette transmission de connaissances au-delà de la fin du projet. Les actions engagées avec les lycées agricoles et la DRAAF seront également menées à terme au-delà de 2020.

Les enjeux sur les protéines végétales et animales sont liés en région : les filières poulet, bovins-viande et bovins-lait sont emblématiques de la région avec des produits sous signe de qualité. Assurer une plus grande autonomie protéique passe par le développement de légumineuses à graines, de légumineuses fourragères, par la gestion optimale des prairies et également par le développement des filières associées, et enfin par le choix des systèmes de culture adaptés aux débouchés possibles pour l'alimentation animale et humaine. Les travaux réalisés peuvent être tous reliés à la problématique de la gestion du cycle de l'azote en contexte de changement climatique, dans un contexte de « santé globale » (Duru *et al.*, 2017). L'azote est en théorie une ressource inépuisable car présent en grande quantité dans l'air. Mais, sous la forme gazeuse, il n'est pas directement accessible à la plupart des organismes vivants. Seules les légumineuses ont la capacité de le fixer, en symbiose avec des bactéries du sol. La synthèse industrielle de l'azote sous forme assimilable par les autres plantes (nitrate) (procédé Haber-Bosch) fait intervenir beaucoup d'énergie non renouvelable et cette production ainsi que le transport et l'épandage de cet azote entraînent l'émission de gaz à effet de serre (GES) sous forme de CO₂ et N₂O. Une mauvaise synchronisation entre l'offre en azote (qu'il soit fourni par les engrais ou par les légumineuses) et les besoins de cultures, entraîne des pertes de nitrates dans les eaux, et une pollution de l'écosystème associé. Travailler sur le flux d'azote et les légumineuses, via une approche systémique pourrait avoir du sens en région : de la captation de l'azote de l'air par les légumineuses aux rejets de GES inhérents à la filière jusqu'aux consommateurs finaux (hommes ou animaux).

Conclusions

Le projet PSDR ProSys a permis de travailler sur plusieurs enjeux majeurs de l'agriculture aujourd'hui. La caractérisation du changement climatique à l'échelle de la région Bourgogne-Franche-Comté et les impacts associés ont donné des résultats qui ont valeur d'exemple et qui pourront être extrapolés à d'autres territoires de France. Le contexte social, économique et environnemental pousse l'agriculture à évoluer voire à changer radicalement. Les systèmes de culture et de production ont été ré-analysés au regard des nouveaux enjeux : préservation des ressources, économie d'intrants, autonomie protéique... Les résultats du projet sur les services écosystémiques rendus par les légumineuses montrent l'intérêt et les limites à leur intégration dans les systèmes de culture. Un des acquis importants de ProSys a été de parvenir à co-construire le projet dès le démarrage avec des partenaires de l'enseignement ou des professionnels agricoles, et de créer des groupes de travail communs sur plusieurs thématiques. En effet, la mutualisation des savoirs et des connaissances, le partage des innovations et le développement de filières sont des enjeux de la réussite du développement de systèmes de culture durables et producteurs de protéines. Dans le contexte actuel de la transition agroécologique, les résultats scientifiques du projet

mais également la démarche de valorisation des résultats scientifiques, de partenariats et de co-construction des savoirs, ont vocation à être diffusés et partagés. La dynamique lancée lors du précédent projet PSDR3 "Profile" a ainsi été renforcée et va probablement se poursuivre au-delà de la fin du projet ProSys. Un moment fort du projet a été la WebTV de clôture (le 1er avril 2021), qui a permis de mettre en relief les résultats obtenus en commun avec le second projet régional (POEETE), sur la polyculture-élevage (WebTV, 2020)

Remerciements

Les études présentées dans cet article ont reçu le soutien financier accordé par le 4e programme PSDR (INRAE, Région Bourgogne Franche-Comté) dans le cadre du projet « ProSys ».

L'ensemble des publications relatives aux 33 projets du programme PSDR4 est consultable : <https://www.psd.fr/>

Références bibliographiques

- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309-332.
- Brulebois E., Richard Y., Castel T., 2017. Modalités et robustesse de la régionalisation du climat de la Bourgogne Franche-Comté. *Note technique d'avancement sur le projet Prosys*, 10.
- Bruyère C.L., Done J.M., Holland G.J., Fredrick S., 2014. Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. *In : Climate Dynamics* 43.7, p. 1847–1856.
- Carnoye L., Michaud F., Tanguy C., Vergote M.H., 2019. La transition agroécologique en grandes cultures en Bourgogne Franche-Comté. Un essai de caractérisation des différentes formes de pratiques alternatives, *Colloque international AFEP-IIPPE*, Lille, 3-5 Juillet.
- Castel T., Lecomte C., Richard Y., Lejeune-Hénaut I., Larmure A., 2017. Frost stress evolution and winter pea ideotype in the context of climate warming at a regional scale. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids* 24, D106.
- Castel T., Lecomte C., Richard Y., Lejeune-Hénaut I., Larmure A., 2019. Évolution rétrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique. *Bourgogne-Franche-Comté Nature*. 29, 323–332.
- Cavan N., Castel T., Pergaud J., Angevin F., Colbach N., 2020. Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique. *Innovations Agronomiques* 81, 209-225.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer D.P., Bechtold P., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. 137(656):553-97.
- Duru M., Justes E., Falconnier G., Journet E.P., Triboulet P., Magrini M.B., 2017. Analyse du concept de santé globale pour accompagner les transitions agricoles et alimentaires : application au cas des légumineuses. *Agronomie, Environnement et Sociétés* 7 (1), 83-95.
- Garcia E., 2018. Analyse des déterminants socio-économiques au développement des pratiques agroécologiques, et notamment à l'insertion des légumineuses dans les assolements en Bourgogne-Franche-Comté. *Mémoire de Master 2 mention Développement Agricole Durable : Sécurité alimentaire pour le développement*, Université Paris Sud. 95 p.
- Gerbaux F., Muller P., 1984. La naissance du développement agricole en France. *Économie Rurale*, 159, 17-22.
- Guinet M., Nicolardot B., Revellin C., Durey V., Carlsson G., Voisin A.S., 2018. Comparative effect of inorganic N on plant growth and N₂ fixation of ten legume crops: towards a better understanding of the differential response among species. *Plant Soil* 432, 207-227.

- Guinet M., Nicolardot B., Voisin A.S., 2020. Nitrogen benefits of ten legume pre-crops for wheat assessed by field measurements and modelling. *European Journal of Agronomy* 120, 126-151.
- Guinet M., Queyrel W., Voisin, A.S., Jeuffroy M.H., Petit M.S., 2021. Retour d'expériences sur des systèmes de culture innovants intégrant des légumineuses en Bourgogne-Franche-Comté. *Collection PSDR 4- ProSys*, 70p.
- Jeuffroy M.H., Vocanson A., Estrade J.R., Meynard J.M., 2012. The use of models at field and farm levels for the *ex ante* assessment of new pea genotypes. *Europ. J. Agronomy*, 42, 68-78.
- Justes E., Thiébeau P., Cattin G., Larbre D., Nicolardot B., 2001. Libération d'azote retournement de luzerne : un effet sur deux campagnes. *Perspectives Agricoles* 264, 22-26.
- Köpke U., Nemecek T., 2010. Ecological services of faba bean. *Field Crop Research* 115, 217-233.
- Larmure A., Bénézit M., Trepos R., Lecomte L., Jeuffroy M.H., 2017. Azodyn-Pea, a crop model to adapt pea crop to climate change. *2nd Agriculture and Climate Change Conference* 26-28 March 2017 – Sitges, Spain (poster, résumé).
- Lecomte C., Giraud A., Aubert V., 2003. Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat in natural conditions. *Agronomie* 23, 51-66.
- Magrini M.B., Anton M., Cholez C., Duc G., Hellou G., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Pelzer E., Voisin A.S., Walrand S., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecol. Econ.* 126, 152-162.
- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Farès M., Le Bail M., Magrini M.B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *Rapport d'étude, INRA*, 226 p.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis, Island Press: 155 p.
- Mitchell R.K., Agle B.R., Wood D.J., 1997. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who or What Really Counts, *Academy of Management Review* 22, 853-886.
- Parlement européen, 2011. Rapport sur le déficit de l'Union en protéines végétales: quelle solution à un problème ancien? Rapporteur : Martin Häusling, A7-0026/2011, 19p.
- Polge E., Torre A., 2015. Contribution à l'évaluation des dispositifs de gouvernance territoriale en Amazonie brésilienne : une analyse des dynamiques d'interactions. *52^{ème} Colloque ASRDLF*, 7-9 Juillet, Montpellier.
- Quinio M., 2015. Assessment of current climate risks on pea crop in France, based on the approach of ecoclimatic indicators. *Mémoire de Master ISARA-Lyon*, 53 p.
- Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets, F., Baillon M., Canellas C., Franchisteguy L., Morel S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92-107.
- Rivaud A., Mathé J., 2011. Les enjeux cognitifs du défi environnemental dans les exploitations agricoles. *Économie Rurale* 323, 21-35.
- Salembier C., Meynard J.M., 2013. Evaluation de systèmes de culture innovants conçus par des agriculteurs : un exemple dans la Pampa Argentine. *Innovations Agronomiques* 31, 27-44.
- Salembier C., Elverdin J.H., Meynard J.M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development* 36, 1–10.
- Schott C., Mignolet C., Meynard J. M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture: évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 17(5), 276-291.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G., 2008. A description of the Advanced Research WRF. Version 3. *National Center for Atmospheric Research, Rapp. tech.* 125 p. Boulder - Colorado, USA.

Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498.

Tibi A., Therond O., 2017. Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. *Synthèse du rapport d'étude*. Inra (France).

Ubertosi M., Prudhon M., Coffin A., Wager M., Badot J.M., Lucot E., 2020. Impacts de systèmes de culture sur la qualité de l'eau, Analyse croisée de dispositifs expérimentaux en Bourgogne-Franche-Comté. Projet PSDR4 ProSys Bourgogne Franche-Comté, *Série les 4 pages PSDR4*. www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.

Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J.F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J., Rose S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.

Vergote M.H., Tanguy C., Garcia E., 2019. Les collectifs producteurs de savoirs pour l'action : retour d'expériences sur l'insertion de légumineuses dans l'assolement en Bourgogne Franche-Comté, *Innovations Agronomiques*, 74, 105-120.

Vertes F., Jeuffroy M.H., Justes E., Thiebeau P., Corson M., 2010. Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. *Innovations agronomiques*, 11, 25-44.

WebTV PSDR4 BFC Des protéines végétales pour l'homme et l'élevage. *Séminaire final des projets PSDR-4 ProSys et Poete*, jeudi 1 avril 2021, Dijon, France : https://www.youtube.com/playlist?list=PLT74_Ig5ickS_k8TJpWdX5hAxFN0kAdLt

Productions du projet (références additionnelles)

Arroyo Sanchez J., 2018. Transferts de nutriments des sols agricoles et impacts sur la macrofaune benthique dans la Haute-Loue. *Mémoire de master 2 « Qualité des Eaux, Sols et Traitements » (QuEST)*. Option : Systèmes Aquatiques et Bassin Versant (SABV), 66 pages.

Astier M., Duc G., Ubertosi M., Lecomte C., Ben Chedly H., Petit M.S., Maire-Amiot A., 2016. PSDR 4: Un programme d'aide à la structuration des filières protéines végétales en Bourgogne-Franche-Comté. *1ères Rencontres Francophones sur les Légumineuses RFL*. Dijon, France, 31 mai-1er juin 2016 (Poster).

Bellassen V., Ay J.S., Hilal M., 2017. The drivers of spatial cropping patterns in Burgundy. *Submitted to Land Use Policy*. 22p.

Bertholon J., Laroche C., Ubertosi M., 2020. Comment répondre à l'autonomie protéique sur les exploitations en polyculture-élevage ? [vidéo], *écriture C. Colson, A. Cuenot, N. Déhé, G. Joly, C. Moureau et M. Sow, Réalisation EDUTER AgroSup Dijon, Collection PSDR 4- ProSys*, www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.

Canovas L., 2018. Impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux - Etude et comparaison des facteurs contrôlant la dynamique des nitrates et du glyphosate sur la parcelle expérimentale de Virey-le-Grand (71). *Rapport de M1SEME*, 32 pages.

Castel T., Lecomte C., Richard Y., Larmure A., 2017. Modelling the regional evolution of frost damage on a winter crop with warming in a temperate climate. *2nd Agriculture and Climate Change Conference*, 26-28 March 2017, Sitges, Spain.

Castel T., Lecomte C., Richard Y., Lejeune-Hénaut I., Larmure A., 2018. Évolution rétrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique. Communication orale aux *15èmes rencontres Bourgogne-Franche-Comté Nature « Changement Climatique, humanité et biodiversité »* St Brisson (58), 19-20 oct. 2018.

Farcy P., Laroche C., Ubertosi M., 2021. Rotations, associations et couverts végétaux [vidéo]. *Ecriture C. Colson, A. Cuenot, N. Déhé, G. Joly, C. Moureau et M. Sow, Réalisation EDUTER AgroSup Dijon, Collection PSDR 4- ProSys*, www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.

Germain T., 2017. Le soja, une production croissante pour une demande en pleine expansion. Expérimentation 2016, *Coopérative Bourgogne du Sud. Rapport de BTS*, 18p.

- Guinet M., Voisin A.S., Nicolardot B., 2016. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude des traits explicatifs. *RFL1, 1^{ères} rencontres francophones sur les légumineuses*, 31 mai-1er juin 2016, Dijon, France (Communication orale et proceedings).
- Guinet M., Voisin A.S., Nicolardot B., 2016. Quantification of nitrogen fluxes induced by legume crops and associated plant traits. *Second International Legume Society Conference*, 12-14 octobre 2016, Troia, Portugal (Communication orale et proceedings).
- Guinet M., Voisin A.S., Nicolardot B., 2016. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude des traits explicatifs. *Atelier prospectif recherches légumineuses avec présentation des thèses en cours, Académie d'Agriculture de France*, 10 novembre 2016, Paris, France, p.14-15 (Communication orale).
- Guinet M., Voisin A.S., Nicolardot B., 2017. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude des traits explicatifs. *RMT Réseau Mixte Technologique Système de Culture Innovant. Journée "Fertilisation"*, 10 mai 2017, Paris, France.
- Guinet M., Voisin A.S., Nicolardot B., 2017. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude des traits explicatifs. *Journée du RMT fertilisation*, 10-11 mai, Paris, France.
- Guinet M., Nicolardot B., Revellin C., Durey V., Carlsson G., Lombard F., Pimet E., Bizouard F., Voisin A.S., 2018. Comparaison de l'effet de la fertilisation azotée sur la croissance et la fixation symbiotique de dix espèces de légumineuses. *RFL2, 2^{èmes} Rencontres Francophones sur les Légumineuses*, 17-18 octobre 2018, Toulouse, France.
- Guinet M., Voisin A.S., Durey V., Pimet E., Lombard F., Nicolardot B., 2018. Effets précédents des légumineuses : fournitures et pertes d'azote liées à leurs résidus de culture : Impacts sur les rendements du blé suivant. *RFL2, 2^{èmes} Rencontres Francophones sur les Légumineuses*, 17-18 octobre 2018, Toulouse, France.
- Guinet M., Nicolardot B., Revellin C., Durey V., Carlsson G., Voisin A.S., 2018. Comparative effect of inorganic N on plant growth and N₂ fixation of ten legume crops: towards a better understanding of the differential response among species. *Plant and Soil* 432:207-227.
- Guinet M., Nicolardot B., Durey V., Revellin C., Lombard F., Pimet E., Bizouard F., Voisin A.S., 2018. Comparative effect of inorganic N on plant growth and N₂ fixation of ten legume crops. *In "20th Nitrogen workshop- Coupling C-N-P-S cycles"*, INRA, Rennes, France.
- Guinet M., Nicolardot B., Durey V., Revellin C., Lombard E., Pimet E., Bizouard F., Voisin A.S., 2019. Fixation symbiotique de l'azote et effet précédent : toutes les légumineuses à graines se valent-elles ? *Innovations Agronomiques*, 74, 55-68.
- Guinet M., Nicolardot B., Voisin A.S., 2019. Comparaison de la multifonctionnalité relative aux flux azotés induits par dix cultures de légumineuses. *Agriculture Environnement et Sociétés*, 9 : 1, 4.
- Guinet M., Nicolardot B., Voisin A.S., 2019. Multifunctional analysis of ecosystem services relative to the nitrogen fluxes provided by ten legume crops. *European Conference on Crop Diversification*. Budapest, Hongrie, 18-21 septembre. Book of abstracts p.134-135.
- Guinet M., 2019. Quantification des flux d'azote induits par les cultures de légumineuses et étude de leurs déterminants : comparaison de 10 espèces de légumineuses à graines. *Thèse, école doctorale Environnement et Santé. Université de Bourgogne-Franche-Comté*, 251 p.
- Guinet M., Nicolardot B., Voisin A.S., 2020. Provision of contrasted nitrogen-related ecosystem services among grain legumes. *Agronomy for Sustainable Development* 40, 33.
- Guinet M., Laroche C., Ubertosi M., 2020. Les services écosystémiques et agronomiques des légumineuses [vidéo]. Ecriture C. Colson, A. Cuenot, N. Déhé, G. Joly, C. Moureau et M. Sow, *Réalisation EDUTER AgroSup Dijon, Collection PSDR 4- ProSys*, www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.
- Hounleke K., 2019. Caractérisation du potentiel de production et de l'effet précédent de légumineuses à graines en Bourgogne-Franche-Comté. *Mémoire d'ingénieur AgroParisTech*, 45p.
- Larmure A., Brayer J.M., Chanis M., Lucot E., Monnet J.C., Castel T., Ubertosi M., 2020. Prise en compte des sols pour l'évaluation du potentiel de production d'une légumineuse d'intérêt : le pois. *Journées IGCS 2020*, 20-22 octobre 2020, Bordeaux, France (Poster).
- Laroche C., Queyrel W., Jeuffroy M.H., Voisin A.S., Lecomte Ch., Ubertosi M., Duc G., Petit M.S., 2018. Traque et analyse de systèmes avec légumineuses en Bourgogne-Franche-Comté pour produire des

- références pour l'action. *RFL2, 2^{èmes} Rencontres Francophones sur les Légumineuses*, 17-18 octobre 2018, Toulouse, France.
- Lecomte C., Duc G., Klein A., Burstin J., 2016. Culture de pois : une offre variétale qui se diversifie. *Journées Tech & Bio*, 27 mai 2016, Aiserey-France (Poster).
- Lecomte C., Duc G., Klein A., Burstin J., 2016. Diversifier les variétés de pois pour répondre aux enjeux actuels. *RFL1, 1^{ères} Rencontres Francophones sur les Légumineuses*, 31 mai - 1er juin 2016, Dijon-France (Poster).
- Lecomte C., Ubertosi M., 2019. L'insertion des légumineuses dans les systèmes de culture. *Séminaire sur la transition agroécologique*. 21 novembre 2019, Paris, France.
- Lecomte C., Laroche C., Ubertosi M., 2020. Impacts du changement climatique sur la culture du pois d'hiver et les stratégies d'adaptation [vidéo]. Ecriture C. Colson, A. Cuenot, N. Déhé, G. Joly, C. Moureau et M. Sow, *Réalisation EDUTER AgroSup Dijon, Collection PSDR 4- ProSys*, www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.
- Munier-Jolain N., Abgrall M., Adeux G., Alletto L., Bonnet C., Cordeau S., Darras S., Deswarte C., Farcy P., Gavaland A., Justes E., Sciara G., Meunier D., Pernelle J., Raffailac D., Gleizes B., Tison G., Ubertosi M., 2018. Projet SYSTEM-ECO4 : Évaluation de systèmes de grandes cultures à faible usage de pesticides. *Projet System-Eco4. Innovations Agronomiques*, 70, 257-271.
- Rakotovao H., 2018. Etude des effets du changement de pratiques sur l'activité biologique des sols et sur la qualité de l'eau : évaluation du potentiel de l'Agriculture de Conservation pour répondre à la problématique de qualité de l'eau dans l'Auxerrois. *Rapport de stage de M2SEME*.
- Ratel B., 2016. Régionalisation du risque gélif du pois d'hiver en Bourgogne Franche-Comté par modélisation numérique: validation du modèle WRF. *Rapport de Master2 - Géo-Biosphère_Parcours ENVI/CLIM*. 38 p.
- Redoutet D., Laroche C., Ubertosi M., 2020. Intégration des légumineuses dans le système de grandes cultures [vidéo]. Ecriture C. Colson, A. Cuenot, N. Déhé, G. Joly, C. Moureau et M. Sow, *Réalisation EDUTER AgroSup Dijon, Collection PSDR 4- ProSys*, www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.
- Revellin C., Laroche C., Ubertosi M., 2020. Comment obtenir des nodosités efficaces ? [vidéo]. Ecriture C. Colson, A. Cuenot, N. Déhé, G. Joly, C. Moureau et M. Sow, *Réalisation EDUTER AgroSup Dijon, Collection PSDR 4- ProSys*, www6.inrae.fr/psdr-bourgogne.
- Revoyron E., 2016. Identification de leviers d'insertion des légumineuses dans les exploitations agricoles. Trajectoires d'évolution et changements de pratiques dans les exploitations agricoles du Plateau Langrois (Côte d'Or). *Mémoire de Master, Université Paris-Saclay, AgroParisTech, ISARA-Lyon*, 53 p + annexes.
- Robin A., 2017. L'impact du Semis-Direct Sous Couvert Végétal sur la qualité de l'eau et des sols. *Stage M2SEME, Université BFC*.
- Saint-Jalmes M., 2017. Traque et analyse de systèmes avec légumineuses en Bourgogne Franche-Comté pour produire des références pour l'action. *Mémoire de fin d'étude, AgroParis Tech*, 67p.
- Salomon S.A., 2017. Etude de la décomposition de systèmes racinaires de différentes espèces légumineuses étudiées au cours d'incubation en conditions contrôlées. *Mémoire M2 Agronomie et Agroalimentaire, Spécialisation Sciences et technologie de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, option sol, Montpellier SupAgro*, 40 p.
- Schneider A., Pelzer E., Jeuffroy M.H., Guinet M., Voisin A.S., Corre-Hellou G., 2018. Analyse comparée de certains services écosystémiques directement ou indirectement liés au flux azotés des systèmes avec légumineuses à graines. *RFL2, 2^{èmes} Rencontres Francophones sur les Légumineuses*, 17-18 octobre 2018, Toulouse, France.
- Tanguy C., Vergote M.H., 2018. Les collectifs, producteurs de savoirs pour l'innovation : retour d'expérience sur la production de légumineuses en BFC. *RFL2, 2^{èmes} Rencontres Francophones sur les Légumineuses*, 17-18 octobre 2018, Toulouse, France.
- Tanguy C., Vergote M.H., 2019. Collectifs en agriculture : réhabiliter l'initiative pour la production de nouveaux savoirs. *56^{ème} colloque de l'ASRDLF*, 4-6 juillet 2019, Lasi, Roumanie.

Tanguy C., Vergote M.H., 2019. Collectifs en agriculture : réhabiliter l'initiative pour la production de nouveaux savoirs, *Journée de recherche « Quels rôles des structures collectives dans le développement de filières agricoles durables ? »*, 26 juin, École d'Ingénieurs de PURPAN, Toulouse, France.

Vergote M.H., Tanguy C., 2020. Collectifs d'échanges de pratiques pour écologiser l'agriculture : éclairer les difficultés d'une approche volontaire. *Développement Durable et Territoires, N° spécial «Les collectifs en agriculture»*, 12 (1) (<https://journals.openedition.org/developpementdurable/18861>).

Thiel P., 2017. Caractérisation de la dynamique de l'eau et des intrants à la parcelle: comparaison de dispositifs. *Stage de M1 B2IPME*, Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon.

Ubertosi M., Lecomte C., 2016. ProSys: L'adaptation pédoclimatique, les impacts environnementaux positifs et la valeur économique de nouveaux systèmes de culture durables producteurs de protéines. *Ecole-chercheurs PSDR-4*, 15-18 novembre 2016, Toulouse, France (Poster).

Ubertosi M., Lecomte C., Boizet F., Astier M., 2016. ProSys, une démarche partenariale pour la construction du projet PSDR Bourgogne Franche-Comté. *Contribution à l'école-chercheurs PSDR-4*, 15-18 novembre 2016, Toulouse, France (Communication orale).

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son DOI)