

Adaptation des systèmes de production agricole aux changements de contexte environnemental, agricole et social, et place des légumineuses dans la transition agroécologique

Ubertosi M.¹, Brunschwig G.², Castel T.³, Chapuis D.⁴, Goron J.-P.⁵, Guinet M.¹, Jarousse A.², Larmure A.¹, Lecomte C.¹, Manteaux J.-P.⁶, Mondière A.², Mosnier C.², Nicolardot B.¹, Petit M.-S.⁷, Queyrel W.¹, Tanguy C.⁸, Thiery E.², Vergote M.-H.⁸, Veysset P.², Voisin A.-S.¹, Laroche 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 Herbivores, VetAgro Sup, INRAE Clermont-Ferrand, 89 avenue de l'Europe, F-63370 Lempdes

³ UMR Biogéosciences, CNRS/UB/EPHE, Univ. De Bourgogne, 6 Bd Gabriel, F-21000 Dijon

⁴ Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, BP 522, F-71010 Macon Cedex

⁵ PEP bovins lait chambre agriculture, 40 avenue Marcelin Berthelot, F-38100 Grenoble

⁶ Chambre Agriculture de la Drôme, 145 avenue Georges Brassens, CS30418, F-26500 Bourg-lès-Valence

⁷ Chambre régionale d'Agriculture de Bourgogne-Franche-Comté, 1 rue des Coulots, F-21110 Bretenière

⁸ CESAER, INRAE Dijon, Institut Agro Dijon, 26 Boulevard Dr Petitjean, F-21000 Dijon

Correspondance : marjorie.ubertosi@agrosupdijon.fr

Résumé

Les projets PSDR4 POEETE et ProSys traitaient de l'adaptation des systèmes de production agricole aux changements de contexte environnemental, agricole et social, en régions Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne-Rhône-Alpes, en s'intéressant aux différentes échelles et en prenant en compte le contexte de la diminution des intrants et de la recherche d'autonomie. Les données traitées sont issues d'approches variées : enquêtes, suivis expérimentaux, modélisation... L'impact du changement climatique sur l'écophysologie des légumineuses a été abordé au travers d'une plante modèle, le pois, et de deux critères : la date de floraison et le stress lié au gel. Pour assurer la durabilité des exploitations en polyculture-élevage, de nouveaux mélanges fourragers ont été testés. Puis les services écosystémiques rendus par les légumineuses ont été étudiés : effet précédent, teneur en azote et intérêt de leur introduction dans une démarche d'amélioration de l'autonomie protéique des exploitations. Des enquêtes auprès des agriculteurs pionniers en région ont permis de réaliser une hiérarchisation des services écosystémiques lors de l'adoption de ces cultures. Enfin la transition agroécologique a été étudiée via des questionnements autour de la complémentarité entre polyculture et élevage, des performances des systèmes de culture incluant des légumineuses, des motivations des agriculteurs pour développer des pratiques plus agroécologiques et l'étude de trajectoires d'exploitations modèles.

Mots-clés : Légumineuses, Systèmes de culture, Polyculture-élevage, Changements globaux, Transition

Abstract: Adaptation of agricultural plant production systems to changes in the environmental, agricultural and social context, and place of legume crops in the agroecological transition

In the Bourgogne-Franche-Comté and Auvergne-Rhône-Alpes regions, the PSDR4 projects POEETE and ProSys dealt with the adaptation of agricultural production systems to changes in the environmental, agricultural and social context, focusing on different scales and taking into account the context of reduced inputs and the search for autonomy by introducing legume crops. The processed data come from various

approaches: surveys, experimental monitoring, modelling approach... The impact of climate change on the ecophysiology of legume crops was addressed through a model plant, the pea, and two criteria: flowering date and frost stress. To ensure the sustainability of mixed farming operations, new forage mixtures have been tested. Then the ecosystemic services provided by legume crops were studied: precedent effect, nitrogen content and interest in improving the protein autonomy of farms. The prioritization of ecosystem services in the adoption of these crops was studied via surveys of pioneer farmers in the region. Finally, the agroecological transition was studied via questions about the complementarity of mixed farming and livestock production, the performance of cropping systems including legume crops, farmers' motivations to develop more agro-ecological practices and the study of model farm trajectories.

Keywords: Legume crops, Cropping system, Mixed crop-livestock farming, Global change, Transition

Introduction

Le changement global induit par les activités humaines depuis la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle (industries, transport, consommation d'énergie) implique des mutations majeures qui concernent tout autant la consommation des ressources naturelles, le changement climatique, que l'évolution et l'alimentation des populations humaines, avec des impacts négatifs importants sur l'environnement. Depuis les années 1950, la mécanisation et l'usage d'intrants de synthèse (engrais azotés et pesticides) ont engendré de fortes simplifications et une spécialisation des systèmes de production agricole européens et des structures associées. En parallèle, avec les accords commerciaux internationaux les importations de tourteau de soja sont devenues la source majeure de protéines végétales pour l'alimentation des animaux d'élevage en Europe (Solanet *et al.*, 2011). L'ensemble de ces évolutions a conduit à une réduction drastique des surfaces agricoles consacrées à la culture de légumineuses en Europe (Voisin *et al.*, 2014). Actuellement en France, la politique agricole intègre le développement d'une agriculture fondée sur les principes de l'agroécologie (Fosse *et al.*, 2019), c'est-à-dire sur la valorisation des fonctionnalités des agroécosystèmes de façon à remplacer les intrants de synthèse par les services fournis par la biodiversité (Isbell *et al.*, 2011). Cette forme d'agriculture nécessite de diversifier les systèmes de production. Pour y parvenir, il est nécessaire de re-concevoir les systèmes de culture et les itinéraires techniques, et de mieux exploiter la complémentarité entre polyculture et élevage (Power, 2010 ; Tibi et Therond, 2017). Ces transformations impliquent des adaptations et l'acquisition de références locales pour l'optimisation de la fourniture de biens communs : production de matières premières végétales et animales, qualité de l'eau et de l'air, production de protéines, réduction des émissions de gaz à effet de serre. La diversité des systèmes de production agricole exige une meilleure caractérisation de leurs forces et faiblesses relatives, notamment quant à leurs capacités à atteindre simultanément plusieurs objectifs environnementaux, mais elle nécessite également une approche sociale permettant l'identification des freins et leviers au développement d'une agriculture agroécologique basée sur le développement et la valorisation de la biodiversité à différentes échelles de temps et d'espace.

Les projets PSDR4 POEETE et ProSys (voir ce volume) ont traité de l'adaptation des systèmes de production agricole (animale et végétale) aux changements de contexte environnemental, agricole et social (climat, diminution des intrants, recherche d'autonomie), en régions Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne-Rhône-Alpes, en s'intéressant aux différentes échelles (système de culture, système d'élevage, exploitation agricole, filières et territoire).

L'adaptation des systèmes de production agricole aux changements de contexte nécessite une approche pluridisciplinaire. Les projets POEETE et ProSys ont permis de rassembler des agronomes en productions animale et végétale, des modélisateurs, des ecophysiologistes, des généticiens, des pédologues, des climatologues, des économistes et des sociologues. Ce collectif avait déjà acquis de nombreuses données en lien avec les problématiques développées, à l'échelle des exploitations et des

territoires. En complément, des enquêtes auprès d'un échantillon d'agriculteurs représentatif de la diversité des profils rencontrés en Bourgogne-Franche-Comté et en Auvergne-Rhône-Alpes, et des enquêtes auprès d'autres acteurs des filières ont été réalisées. De plus, des expérimentations au champ ont été conduites dans des exploitations faisant partie de réseaux (réseau Dephy, GIEE...), des parcelles d'un domaine expérimental INRAE et des fermes de lycées agricoles des régions concernées. La dernière approche mobilisée est la modélisation : plusieurs modèles climatiques, agronomiques ou de gestion des exploitations ont été utilisés, voire mis au point. Ces modèles sont globaux (modèles agronomiques et climatiques), régionalisés (modèles climatiques), ou intégrant la dimension de proximité entre acteurs (modèles économétriques, modélisation bioéconomique des échanges entre exploitations). Ils permettent de valoriser les données issues d'expérimentations ou de bases de données. Ils permettent également d'évaluer et de réaliser des projections selon différents scénarii sous forme d'expérimentations *in silico*.

1. Impacts du changement climatique sur les cultures de légumineuses et pistes d'adaptation

Les systèmes de production doivent s'adapter à plusieurs changements importants du contexte agricole, regroupés sous le terme de changements globaux. Parmi eux, le changement climatique d'échelle globale impacte de manière différenciée selon les territoires les productions végétales de grandes cultures et les systèmes de polyculture-élevage, tout comme le fonctionnement des élevages eux-mêmes. Cette évolution du climat concerne déjà toutes les productions animales et végétales, ses premiers effets se font sentir, et elle s'étudie à différentes échelles : monde, Europe, France, régions. Nos projections l'ont déclinée à l'échelle régionale car il est nécessaire d'évaluer ces effets afin de se projeter et d'anticiper les évolutions à venir de façon à adapter les systèmes de production. Cette question peut être abordée à travers deux approches : une approche de modélisation, basée sur le couplage des modèles climatiques et des modèles agronomiques, et une approche expérimentale basée sur des suivis expérimentaux au champ et des enquêtes.

1.1 Simulation de l'évolution du climat à une échelle agricole

L'évaluation des impacts actuels et futurs du changement climatique sur la culture et la production des légumineuses, à des échelles locales compatibles avec celles de la décision agricole/du conseil agricole, impose d'estimer les caractéristiques possibles du climat régional. Cela a été réalisé en Bourgogne Franche-Comté pour la période du 21^e siècle grâce à des simulations climatiques.

Pour produire des données 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 WRF (Skamarock *et al.*, 2008). Un premier jeu de données climatiques de forçage à large échelle ("réanalyses" ERA-INTERIM ; Dee *et al.*, 2011) a été utilisé pour valider le protocole de la désagrégation dynamique, utilisé sur la période dite historique (1980-2016) pour simuler le climat à l'échelle régionale à une résolution cible de 8 km et au pas de temps quotidien. Les données produites ont ensuite été comparées aux données SIM (Safran-Isba-Modcou) de Météo-France pour validation. Les caractéristiques du protocole et la validation des simulations sont présentées dans Brulebois *et al.* (2017) et dans Cavan *et al.* (2020).

Le modèle WRF a ensuite été forcé selon le même protocole par les projections climatiques produites par le modèle CCSM4 (Bruyère *et al.*, 2014) dans le cadre du programme international CMIP5 (Taylor *et al.*, 2011). Deux scénarii climatiques ont été retenus parmi ceux décrits par le GIEC : les RCP 4.5 et 8.5 (Representative Concentration Pathway), conduisant respectivement à une augmentation des températures moyennes annuelles terrestres de 2 et 4°C d'ici à 2100.

Les valeurs journalières de 5 variables, les températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax), les précipitations (PP), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le rayonnement global (Rg) ont été extraites afin de permettre d'alimenter les modèles agronomiques.

1.2 Exemples d'impacts de l'évolution des températures sur le pois d'hiver

Les données simulées des 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 résistance au gel est calculée chaque jour en tenant compte de la variété (caractérisée par un seuil de résistance et une durée d'acclimatation), de la date de semis et du régime de températures auquel les plantes sont soumises. Les dégâts de gel sont décrits par le nombre de jours où la température minimale journalière passe sous la résistance calculée. Il a été montré que le cumul des écarts entre ces deux valeurs (indice de stress gel) était significativement corrélé aux dégâts observés (Castel *et al.*, 2017).

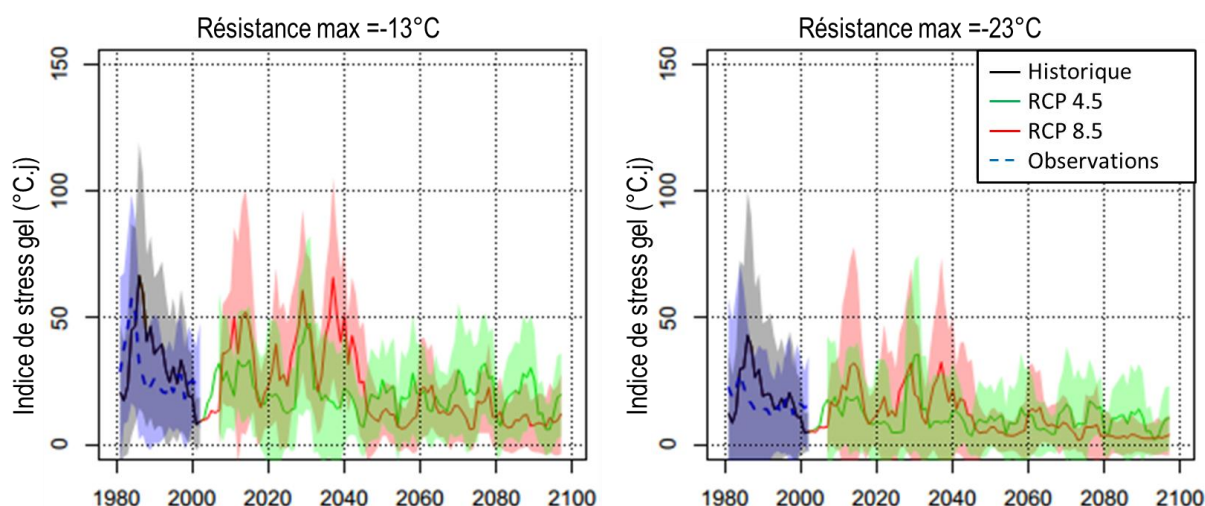


Figure 1 : Evolution de l'intensité des dégâts de gel hivernal, pour deux niveaux de résistance variétale (-13°C et -23°C), pour plusieurs dates de semis (2, 10, 21 et 31 octobre) et plusieurs durées d'acclimatation (35 à 49 jours par pas de 2 jours). Le stress gel hivernal est évalué pour chaque hiver par la somme des différences entre la résistance calculée par le modèle et la température minimale quand elle est inférieure à la température de 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).

Pour la période historique (1980-2003), le stress gel calculé à partir des données climatiques observées est du même ordre de grandeur que celui calculé à partir des données climatiques simulées. On observe néanmoins pour certaines années une surestimation du stress gel calculé à partir du climat simulé (Figure 1).

Pour les projections, l'intensité du stress gel ne diminue pas jusqu'en 2040/2050 quel que soit le scénario de réchauffement. 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 niveau de résistance. Ainsi il est souhaitable de proposer des variétés qui gardent un bon niveau de résistance au gel et une durée d'acclimatation courte pour s'adapter plus rapidement aux à-coups de températures entre des périodes

de gel et des périodes de redoux. Ces caractéristiques variétales sont deux leviers importants pour s'adapter aux épisodes froids et soudains qui peuvent se produire au milieu d'un hiver doux comme par exemple l'hiver 2011/2012 où des dégâts gélifs sévères sur le pois d'hiver ont été observés.

Sur les données historiques, une étude parallèle (Castel *et al.*, 2017 ; 2019) a montré une évolution subtile du risque : l'intensité des dégâts de gel a diminué alors que le nombre de jours avec des dégâts a augmenté. Ce paradoxe, ainsi que le maintien du niveau de dégâts dans nos simulations jusqu'en 2050, s'expliquent par le fait que 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.

Un deuxième modèle agronomique a été utilisé pour étudier la date de floraison du pois (Figure 2). Ce modèle utilise la somme de températures depuis le semis et la photopériode (durée du jour) (Quinio, 2015). Il a été validé pour une variété de pois de printemps (Lumina) et une variété de pois d'hiver (Isard) sur des données expérimentales issues de plusieurs programmes de recherche (CTPS "Pois d'hiver" 2007-2009, PIA PeaMUST 2012-2020).

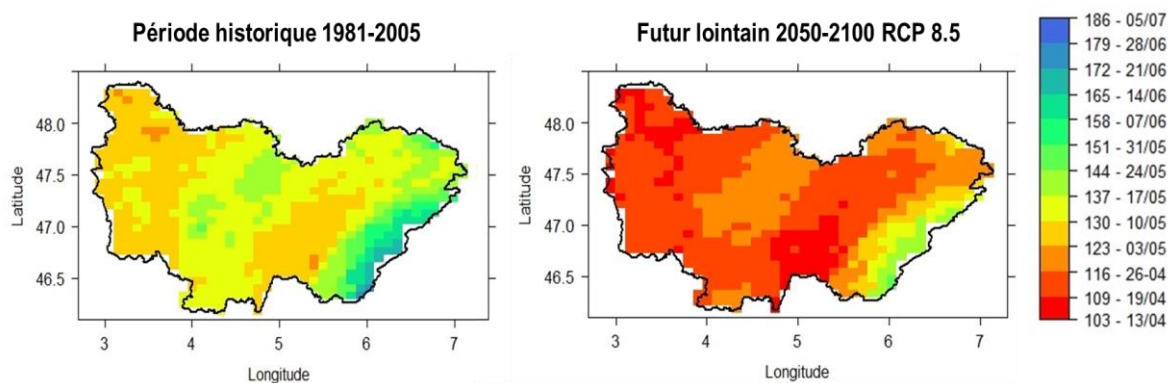


Figure 2 : Évolution de la date du stade début floraison entre la période historique (1981-2005) et le futur lointain (2050-2100) en Bourgogne-Franche-Comté (à une maille de 8 x 8 km) pour une variété de pois d'hiver (Isard), selon le scénario de réchauffement le plus marqué (RCP 8.5).

L'évolution de la date de début floraison a été simulée chez une variété de pois d'hiver semée au 1^{er} novembre, sur le territoire de la région Bourgogne-Franche-Comté (suivant une maille de 8 x 8 km) entre la période historique et le futur lointain, pour le scénario de réchauffement le plus rapide vers lequel nous nous engageons actuellement. L'avancée du stade floraison entre ces deux périodes sera de l'ordre de 2 semaines en moyenne, et environ 3 semaines sur les reliefs. En conséquence, il sera essentiel d'adapter le positionnement du cycle cultural du pois, soit en retardant les dates de semis à l'automne pour que le stade initiation florale, sensible au gel, n'apparaisse pas de façon trop précoce en sortie d'hiver, soit en utilisant des variétés sensibles à la photopériode, qui attendent une durée du jour suffisante pour initier leur phase reproductrice.

1.3 Choix de nouveaux mélanges fourragers en polyculture-élevage

Les évolutions climatiques impactent la production de fourrages, réduisant fortement la production d'été (maïs, 3^{ème} coupe de luzerne...) et le pâturage. Il est donc nécessaire d'identifier des compositions prairiales résilientes au stress hydrique et aux fortes températures. Ainsi, des expérimentations de plusieurs compositions pâturées ou fauchées ont été conduites à la ferme expérimentale en polyculture-élevage (bovin lait) de l'EPLFPA Le Valentin dans la Drôme. Des mélanges intégrant des espèces méditerranéennes et incluant des légumineuses pour améliorer l'autonomie protéique de l'élevage ont été semés.

Depuis 2011, la ferme cultive une prairie multi-espèces pâturée comprenant un ensemble d'espèces dont 3 graminées (fétuque élevée, dactyle, ray-grass anglais), 5 légumineuses (luzerne, sainfoin, trèfle violet, trèfle blanc, lotier) et des espèces diverses comme la chicorée. Cette prairie temporaire est conservée 4 ans puis elle est suivie dans la rotation par 4 années de culture (maïs, méteil grain...). Cette prairie est conduite en agriculture biologique et est irriguée si nécessaire (ex. 3 irrigations en 2019). En 3 années d'exploitation, le mélange est resté équilibré : 41 % des espèces présentes sont des graminées et 35 % sont des légumineuses. Les espèces plus particulièrement favorisées ont été le dactyle (23 % du mélange), la luzerne (13 % du mélange) et la chicorée (21 % du mélange) (Figure 3). Le rendement moyen sur 10 ans (2011-2020) est de 13 t de MS/ha.

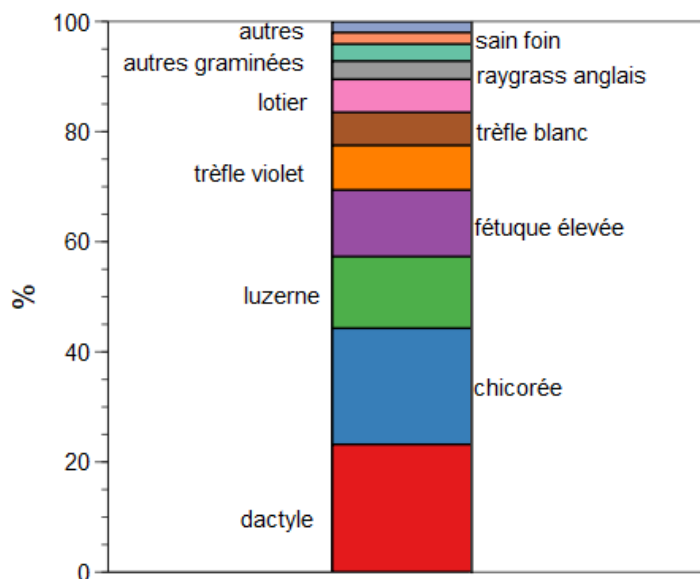


Figure 3 : Répartition des espèces présentes en 2017 dans la prairie permanente multi-espèces pâturée de la ferme de l'EPLFPA Le Valentin (26).

Depuis 2016, des essais ont également été conduits sur des prairies temporaires multi-espèces fauchées afin de valider l'hypothèse selon laquelle les mélanges permettraient de mieux résister aux aléas climatiques. Sur ces prairies, 3 coupes successives sont réalisées chaque année. Plusieurs modalités ont été testées : prairies avec introduction de légumineuses annuelles (trèfle de Perse, serradelle rose, trèfle vésiculé, trèfle de Jamin, trèfle raboteux) ou avec introduction de légumineuses pérennes (trèfle du Caucase, trèfle "fraise", trèfle souterrain) et comparaison de variétés de luzerne en culture pure ou en mélange avec notamment des variétés méditerranéennes. Ces mélanges à base de luzerne pourraient permettre de réaliser des stocks au début du printemps (sur les 1^{ère} et 2^{ème} coupes), puis à l'automne si le regain le permet afin d'étaler dans le temps la période de récolte. Deux légumineuses annuelles (trèfle de Perse et trèfle raboteux) sont intéressantes du fait de leur propension à couvrir le sol et à se développer rapidement dès la première année, et une légumineuse pérenne (trèfle fraise) est assez couvrante tout en résistant bien à la sécheresse. Leur production, de l'ordre de 9 t MS/ha pour les 3 coupes cumulées en 2017, est inférieure à la moyenne des luzernes (12.5 t MS/ha) ou des prairies multi-espèces (11.5 t MS/ha) mais reste intéressante pour sa résistance à la sécheresse (Figure 4).

Dans les prairies en mélange fauchées, la composition est assez rapidement dominée par 3 ou 4 espèces, dont la luzerne qui représente jusqu'à 70 % de la couverture du sol et le dactyle (10 à 20 %). La présence de luzerne dans le mélange permet d'augmenter la production d'environ 4 t MS/ha par rapport à une prairie multi-espèces sans luzerne. Ainsi cette espèce apparaît bien adaptée aux contraintes climatiques qui prévalent dans la région de Valence. Le mélange "Pradel", comprenant une

part plus importante d'espèces qui résistent à la sécheresse (fétuque élevée, dactyle, sainfoin et chicorée) donne des performances supérieures à tous les autres mélanges et à la luzerne seule (Figure 4).

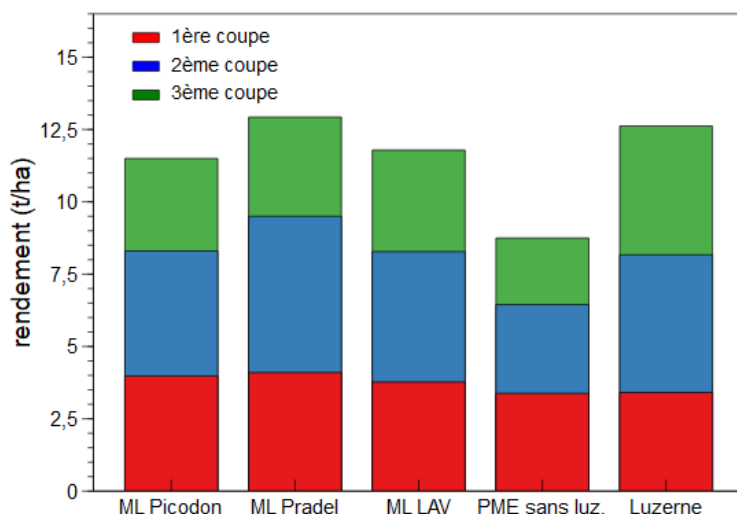


Figure 4 : Production moyenne sur 2 ans (2017 et 2018) de 5 prairies fauchées (3 coupes). 3 mélanges multi espèces comprenant de la luzerne (ML Picodon, ML Pradel et MLLAV : Lycée Agricole Valentin), une prairie multi-espèces sans luzerne (PME sans Luz) et une prairie constituée uniquement de luzerne (Luzerne 100 %).

Ces essais montrent l'intérêt d'adapter la composition des prairies dans le contexte du réchauffement climatique en choisissant de nouveaux mélanges fourragers. Menés aujourd'hui dans la vallée du Rhône, ils pourraient représenter demain des pistes d'adaptation pour l'approvisionnement fourrager en Bourgogne-Franche-Comté.

2. Les services rendus par les légumineuses dans les systèmes de culture

L'introduction de légumineuses constitue une voie de diversification s'appuyant sur la complémentarité des services écosystémiques rendus et des fonctions délivrées par ces dernières (Köpke et Nemecek, 2010 ; Tibi et Therond, 2017). Elles assurent un service d'approvisionnement, lié à la production de graines et de fourrages riches en protéines pour l'alimentation humaine et animale. Elles permettent des économies d'intrants azotés l'année de leur implantation grâce à la fixation symbiotique et l'année suivante grâce à la minéralisation de leurs résidus (Guinet *et al.*, 2020a). De plus, les légumineuses représentant environ 3 % des surfaces cultivées en France, leur réintroduction permettrait une diversification des assolements et contribuerait ainsi à la rupture des cycles des bioagresseurs et favoriserait la présence d'auxiliaires.

2.1 Motivations pour l'introduction de légumineuses dans les systèmes de culture

Un repérage et une analyse de systèmes mis en œuvre par des agriculteurs intégrant des légumineuses de manière réussie et satisfaisante ont été mis en œuvre. Il s'agissait de recenser une diversité de modes d'insertion en fonction des services observés. Les services les plus souvent observés sont l'augmentation de l'autonomie en protéines des exploitations agricoles, l'amélioration de la structure du sol, la régulation des adventices ou encore l'apport de matière organique dans le sol. 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 céréales. Les plantes

compagnes et les 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 fourragères ou à graines contribue à la gestion des graminées (Guinet *et al.*, 2021).

2.2 Origine de l'azote accumulé par différentes espèces de légumineuses

Des expérimentations réalisées en 2014 et 2016 sur l'unité expérimentale 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 atmosphérique et azote minéral du sol). Le fenugrec, le lupin, la féverole, le pois, la lentille et la vesce commune ont été semés en mars tandis que le soja, le haricot, le pois chiche et la vesce de Narbonne ont été semés en mai. Aucun apport d'azote minéral n'a été réalisé. Les rendements en graines, variables entre les espèces de légumineuses ont été largement influencés par les conditions climatiques de l'année, les graines de pois chiche et vesce de Narbonne n'ont pas été récoltées en 2014.

La quantité d'azote fixée varie de 87 kg N/ha (vesce commune) à 365 kg N/ha (féverole) pour les espèces semées en mars, et de 60 kg N/ha (vesce de Narbonne) à 290 kg N/ha (soja) pour les espèces semées en mai. 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 5). 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.

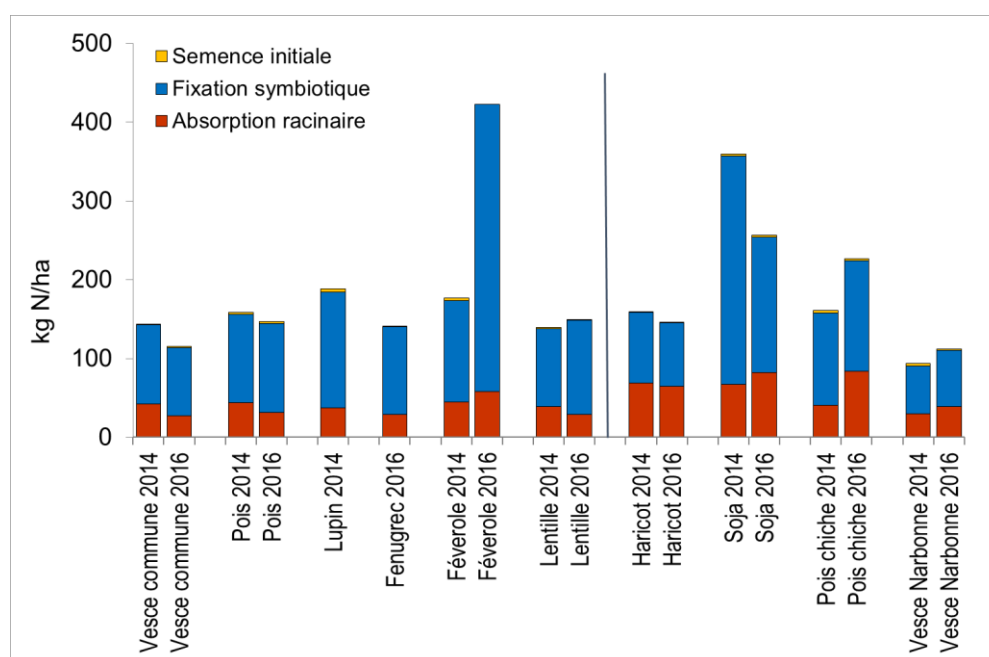


Figure 5 : Origine de l'azote accumulé par les différentes espèces en 2014 et 2016 ; à gauche espèces semées en mars, à droite espèces semées en mai (Guinet *et al.*, 2018).

Les variations des quantités d'azote fixées entre espèces dépendent à la fois des caractéristiques spécifiques à chaque espèce et des conditions climatiques. Des études complémentaires ont montré qu'en présence d'azote minéral dans le sol les légumineuses prélèvent préférentiellement cet azote minéral. Le déclenchement de la fixation symbiotique a lieu lorsque le niveau de disponibilité en azote minéral devient insuffisant pour subvenir aux besoins de la plante pour sa croissance. De plus, l'efficacité

de prélèvement de l'azote minéral du sol des espèces étudiées est corrélée à la vitesse d'exploration racinaire horizontale (Guinet, 2019).

2.3 Effet précédent des légumineuses

Il existe des différences de quantités de résidus et de teneurs en azote entre espèces de légumineuses ce qui conduit à des effets « précédents » différents. Dans nos expérimentations sur le site de Bretenière, à la suite de la culture de chaque légumineuse à graines, les résidus de culture ont été enfouis et une culture de blé non fertilisée a été implantée en 2015 et en 2017. Les quantités d'azote présentes dans les parties aériennes du blé ont été mesurées (Figure 6). Deux parcelles témoin ont été conduites avec un précédent orge de printemps pour les espèces de légumineuses semées en mars et avec un précédent sorgho pour les espèces semées en mai. L'orge et le sorgho ont été fertilisés de manière raisonnée.

Les rendements du blé cultivé après des légumineuses semées en mars étaient supérieurs en moyenne de 7.7 q/ha en 2015 et 9.4 q/ha en 2017 par rapport à un blé cultivé après le précédent orge. Les rendements les plus élevés ont été mesurés après féverole et lentille. Les rendements du blé cultivé après des légumineuses semées en mai étaient supérieurs en moyenne de 19.4 q/ha en 2015 et 17.3 q/ha en 2017 par rapport à un blé cultivé après le sorgho. Les rendements les plus élevés ont été mesurés pour le blé précédé de la vesce de Narbonne enfouie plante entière.

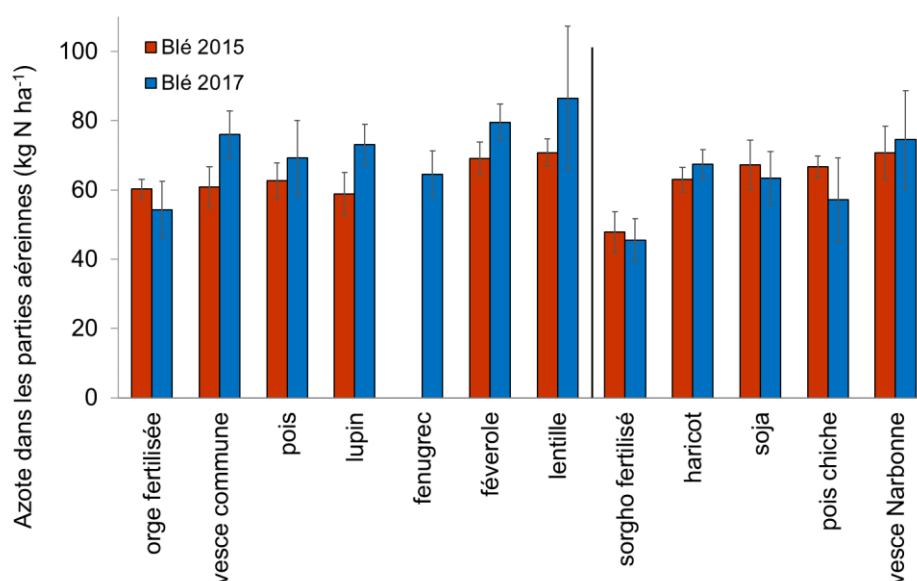


Figure 6 : Quantités d'azote présentes dans les parties aériennes à la récolte du blé en 2015 et 2017 en fonction de la culture précédente (légumineuse ou céréale de référence) semée en mars (à gauche du trait) ou semée en mai (à droite du trait) (Guinet *et al.*, 2020b).

Pour le blé cultivé après des légumineuses semées en mars, les quantités d'azote retrouvées dans le blé ont été en moyenne respectivement de 64.4 et 74.8 kg N/ha en 2015 et 2017. Pour le blé après le précédent orge les quantités d'azote ont été de 60.3 et 54.3 kg N/ha. Les valeurs les plus élevées ont été obtenues après les précédents lentille et féverole (Figure 6). Pour le blé cultivé après les légumineuses semées en mai, les quantités d'azote retrouvées dans le blé ont été en moyenne respectivement de 66.9 et 65.6 kg N/ha en 2015 et 2017. Pour le blé après le précédent sorgho, les quantités d'azote ont été de 45.8 et 45.5 kg N/ha. Les quantités d'azote disponibles pour le blé ont été fonction des quantités d'azote minéral présentes dans le sol, additionnées des quantités d'azote minéralisées 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. Ainsi, la vesce de Narbonne, la féverole, le fenugrec, la lentille et la vesce commune ont été identifiées comme de bons précédents.

2.4 Exemple d'autonomie protéique en troupeau laitier

Un essai a été conduit au lycée agricole de Fontaines (71) dans l'objectif d'évaluer l'impact du remplacement du maïs ensilage dans la ration sur les performances du troupeau laitier (Bertholon *et al.*, 2020). L'arrêt du maïs s'est fait progressivement : tout d'abord une substitution importante du maïs a été faite par une culture de dérobées estivales riches en protéines, puis une substitution totale du maïs ensilage par des méteils « protéiques » ensilés contenant moins de 20 % de céréales. La production laitière s'est globalement maintenue (perte de ~1 kg de lait/vache/jour), les critères de qualité du lait restant inchangés. D'un point de vue économique, la ration substituée permet une économie importante de correcteur azoté (tourteaux Soja/Colza) sous réserve d'avoir atteint à minima 15 % de protéines dans les fourrages. Il faut cependant nuancer les résultats en fonction du ratio rendement maïs vs. cultures dérobées. Par ailleurs, les besoins en céréales sont plus élevés pour corriger la ration en énergie. D'un point de vue agronomique, les cultures dérobées et les méteils permettent de diversifier l'assolement et de bénéficier des services écosystémiques rendus par les légumineuses. Toutefois, la culture de méteil nécessite plus de surface et de temps de travail que le maïs ensilage pour les mêmes performances. La recherche d'autonomie protéique doit donc être raisonnée globalement, en prenant en compte tous les piliers de la durabilité.

3. La transition agroécologique pour reconcevoir des systèmes de culture incluant des légumineuses

La transition agroécologique passe par la reconception des systèmes de production. L'analyse des trajectoires des exploitations et des exploitants permet de décrypter les finalités portées par les agriculteurs. La complémentarité des cultures et de l'élevage permet aux exploitations agricoles en polyculture-élevage (PCE) d'augmenter leur durabilité en maximisant les interactions et le bouclage des cycles biologiques entre les deux ateliers. Ainsi la PCE représente un système favorable pour amorcer ou renforcer la transition agroécologique des exploitations agricoles. La complémentarité polyculture-élevage peut également être abordée à l'échelle des territoires via des transactions ou échanges entre exploitations. En grandes cultures, une avancée dans la transition agroécologique passe par la reconception de systèmes de culture afin de maximiser les services écosystémiques rendus par des variétés choisies tout en maintenant la productivité de ces systèmes. Identifier des agriculteurs pionniers, ayant mis en place des systèmes de culture innovants permet de caractériser les freins et leviers tant techniques que socio-économiques à l'adoption et la diffusion de ces systèmes.

3.1 Evaluation du prix d'échange du fumier grâce au modèle Orfee

Le modèle bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment ; Mosnier *et al.*, 2017) a permis de simuler le fonctionnement d'une exploitation avec un ou plusieurs ateliers d'élevage de ruminants et des ateliers de cultures de céréales et d'oléo-protéagineux ainsi que de plantes fourragères et de prairies. Il optimise les choix de production, notamment de taille et de production du troupeau, de rations des animaux, d'assolement et de production végétale, de main-d'œuvre et de matériel utilisé pour maximiser une fonction objectif (résultat courant) sous un ensemble de contraintes stratégiques (autonomie alimentaire minimum, cahier des charges etc.), structurelles (surfaces, main-d'œuvre et bâtiments disponibles), techniques (rotations, opérations culturales, besoins alimentaires de troupeau etc.) ou réglementaires.

Ce modèle utilise un module de culture, qui calcule des besoins en éléments minéraux en fonction du rendement des cultures et prend en compte des effets précédent/suivant dans la modulation des besoins et des rendements. Pour modéliser des exploitations de polyculture-élevage, les modules de culture et de fertilisation ont été modifiés. Le module fertilisation utilise l'équation du bilan azoté tirée du guide méthodologique du calcul de la fertilisation azotée (Comifer, 2013). La fertilisation organique et le devenir des résidus de culture, ici les pailles, ont un impact sur la minéralisation de la matière organique stable du sol (humus).

L'application de fumier a un intérêt pour le stockage de matière organique dans le sol si la fréquence d'apport est régulière et si la quantité apportée est significative. Ainsi Ziegler et Hédut (1991) estiment qu'au-delà d'un intervalle de 4 ans entre deux applications de fumier, l'effet attendu est négligeable. Pour ce qui est de la quantité à apporter, les références proposées varient de 7 t à 45 t par ha sur un intervalle de temps plus long (Sleutel *et al.*, 2006). Avec l'aide d'experts, la quantité de fumier à apporter a été fixée à 24 t tous les deux ans pour un maintien ou une augmentation de la matière organique dans les parcelles cultivées. L'hypothèse est que l'application régulière de fumier sur les parcelles de l'exploitation avec exportation des pailles, augmente la vitesse de minéralisation de l'azote ainsi que les stocks d'azote dans le sol. Par conséquent après dix ans d'application régulière de fumier, la disponibilité en azote du sol augmente et la quantité d'azote à apporter diminue. Deux valeurs de minéralisation de l'humus ont ainsi été définies : la première correspond à des apports d'engrais organiques irréguliers ou réguliers mais depuis peu de temps (moins de trois années d'application) avec un enfouissement régulier des pailles (33 kg N/ha/an), la seconde à des apports de fumier régulier sur le long terme et une exportation partielle des pailles (50 kg N/ha/an).

Les résultats obtenus permettent de calculer une fourchette de prix d'échange pour du fumier, entre une exploitation d'élevage et une exploitation de culture. Sur le court terme, un prix au plus de 11 €/t de fumier et une vente de paille au moins à 60 €/t (au départ de la ferme) permettraient au céréalier de ne pas perdre de revenu par rapport à l'épandage d'engrais minéral et à l'enfouissement des pailles. Une application régulière sur le long terme permettrait d'envisager des prix d'échange plus élevés, le céréalier trouvant un intérêt économique à acheter le fumier jusqu'à un prix de 17 €/t (hors coût de transport), ce qui semble réaliste dans la perspective d'un investissement à long terme pour améliorer la qualité du sol. Ainsi les résultats soulignent l'intérêt de cette transaction pour les deux exploitations et l'importance d'envisager une application suivie de fumier sur le long terme.

3.2 Evaluation des performances de systèmes de culture avec légumineuses chez l'exploitant

Les agriculteurs sont source de solutions innovantes souvent difficiles à identifier. La traque à l'innovation est une méthodologie qui permet de repérer ces innovations techniques, systémiques ou organisationnelles conçues par des agriculteurs à partir d'un cahier des charges de ce que l'on recherche, à les caractériser sous forme de pratiques cohérentes, à évaluer leurs performances agronomiques, économiques et environnementales, à en préciser les conditions de réussite et à les formaliser (Salembier et Meynard, 2013 ; Salembier *et al.*, 2016).

La traque réalisée en différentes phases successives auprès de conseillers et d'agriculteurs de Bourgogne-Franche-Comté a permis d'identifier des systèmes de culture incluant des légumineuses de manière réussie et satisfaisante pour les agriculteurs. A partir des données d'enquête, il a été possible de réaliser une analyse décisionnelle de ces systèmes. Les résultats de ces 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. Parmi les systèmes recensés, 33 occurrences d'insertion de légumineuses ont été repérées.

Les indices de fréquence de traitement (IFT) des systèmes avec légumineuse étudiés sont inférieurs (0,8 à 4,2) aux 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 des systèmes de référence (12,6 GJ/ha) avec 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, de les extrapoler à d'autres situations et de les présenter dans un livret à destination des agriculteurs (Guinet *et al.*, 2021).

3.3 Opportunité de l'application des principes de l'agroécologie aux fermes de lycées agricoles

Les fermes des lycées agricoles sont des supports pédagogiques qui doivent, entre autres, permettre aux futurs agriculteurs de concevoir ou reconcevoir leurs propres fermes. Les responsables de ces fermes et les équipes pédagogiques se posent la question de l'adéquation de leur système de production avec les principes de l'agroécologie enseignés en parallèle. Différents scénarios d'évolution ont été co-construits avec les responsables des fermes des quatre lycées agricoles partenaires des projets afin de tester en quoi la modélisation peut être un outil d'aide à la transition agroécologique. L'établissement public des terres de La Brosse (89) possède un troupeau de vaches laitières et des grandes cultures ; l'EPLFPA de Fontaines (71) a un troupeau de vaches laitières, de vaches allaitantes, des volailles et des grandes cultures ; le lycée agricole de la Côte Saint André (38) possède des ovins viande, des vaches laitières, un atelier apicole et des grandes cultures ; l'EPLFPA le Valentin (26) produit en agriculture biologique et détient des vaches laitières, des arbres fruitiers et des grandes cultures.

Le modèle de simulation Orfee (Mosnier *et al.*, 2017) a été utilisé pour simuler le fonctionnement des exploitations des 4 lycées. Deux améliorations du modèle ont dû être apportées pour effectuer ces simulations : l'introduction des intercultures et du pâturage tournant dynamique. Différentes interactions entre les cultures et le bétail ont été prises en compte : 1) L'introduction de cultures fourragères et de prairies temporaires dans des rotations plus longues avec des cultures diminue l'usage d'intrants de synthèse. 2) Les effluents d'élevage peuvent se substituer aux engrais minéraux et diminuer les intrants. 3) À long terme, le fumier augmente la minéralisation de la matière organique en azote disponible pour les plantes. 4) La récolte de la paille utilisée pour la litière animale plutôt que son enfouissement réduit les besoins en azote des cultures de 10 kg N/ha/an.

Les chefs d'exploitations souhaitent pour la plupart modifier leur système d'exploitation vers davantage de pratiques agroécologiques. Ceci s'est traduit par des objectifs d'autonomie alimentaire des troupeaux accrue, avec dans certains cas une place de l'herbe plus importante. Les exploitations en agriculture conventionnelle souhaitent également tester le passage en agriculture biologique. D'autres stratégies étaient plus spécifiques à certains lycées, comme le changement de race laitière ou la suppression d'un atelier allaitant. Les stratégies ont été testées selon une logique agroécologique croissante : situation de référence de l'exploitation, optimisation économique avec le minimum de contrainte agroécologique, autonomie alimentaire, et autonomie alimentaire en système herbager et agriculture biologique.

Les premiers résultats montrent que les stratégies simulées mobilisent les cultures telles que les méteils (mélanges céréales-protéagineux), les prairies temporaires et les intercultures, ainsi que les techniques de pâturage tournant dynamique dans la quasi-totalité des scénarios simulés. Ces cultures permettent de réduire la quantité d'intrants utilisés et d'augmenter les surfaces en herbe, avec un impact favorable sur l'environnement. La production laitière est souvent privilégiée au détriment de la production de vaches ou de brebis allaitantes du fait de sa rentabilité économique. Les simulations permettent globalement de maintenir ou d'améliorer les résultats économiques mais elles ont des résultats plus contrastés concernant les performances environnementales des exploitations. Du fait de son implémentation longue à mettre en place, la modélisation paraît constituer un outil d'aide à la réflexion et non à la décision, mais

qui s'avère très utile dans le cadre de la formation agricole pour étudier les liens entre les différents ateliers et les impacts de modifications internes ou externes aux systèmes, ainsi que pour co-concevoir des systèmes innovants.

3.4 Penser la complémentarité polyculture-élevage à l'échelle des territoires

Au-delà d'une approche de la transition agroécologique à l'échelle des exploitations, cette question peut également être envisagée à une échelle territoriale, via des échanges entre exploitations différentes.

Le modèle Orfee (Mosnier *et al.*, 2017) a été utilisé pour calculer le prix d'intérêt du foin de luzerne, c'est-à-dire le prix à partir duquel l'agriculteur produit ou achète de la luzerne sans perdre de revenu par rapport à sa situation sans luzerne, dans une démarche d'échange ou d'achat en local. Trois exploitations types en Auvergne-Rhône-Alpes ont été considérées : une exploitation spécialisée en grandes cultures en plaine et deux exploitations en élevage bovins laitiers. La première est un système herbager de piedmont avec une production en lait standard. La seconde est un système avec production et transformation fromagère sous IGP Tomme et Emmental. Ces trois systèmes de production ont été optimisés selon trois scénarios : 1) sans foin de luzerne (témoin), 2) possibilité de produire ou d'acheter du foin de luzerne, sans engagement de quantité mais avec des prix fluctuants selon le cours des fourrages, 3) possibilité de produire ou d'acheter du foin de luzerne, avec engagement de la quantité sur 3 ans et prix garanti. Les prix d'intérêt du foin de luzerne ont été estimés et correspondent au prix à partir duquel chaque agriculteur retire au moins autant « d'utilité » à produire ou acheter de la luzerne qu'à ne pas le faire.

Dans le modèle, ont été pris en compte plusieurs effets agronomiques de la luzerne : les besoins en azote calculés pour la luzerne sont nuls, car fournis par la fixation symbiotique de l'azote. Les besoins azotés de la culture suivante sont réduits de 60 kg N/ha et les rendements augmentés de 5 % pour prendre en compte l'effet précédent dans le modèle (Comifer, 2013).

Pour du foin de luzerne, une fourchette de prix de vente a été établie entre 145 et 151 €/t pour le céréalier et une fourchette de prix d'achat de 179 à 181 €/t pour l'éleveur en lait standard et de 201 à 206 €/t pour l'éleveur en IGP (Figure 7). Ces premiers résultats semblent réalistes et montrent que les agriculteurs (éleveurs et céréaliers) peuvent trouver un intérêt économique dans cet échange, même si celui-ci reste modéré. Cette étude a également montré un écart important dans le prix d'intérêt pour les deux exploitations d'élevage, mettant en évidence une meilleure propension à payer pour l'élevage avec une production fromagère sous IGP. S'ajoute à ce premier critère économique un réel intérêt sur la traçabilité du fourrage acheté, ainsi que sur l'image d'une production locale (Thiery *et al.*, 2020).

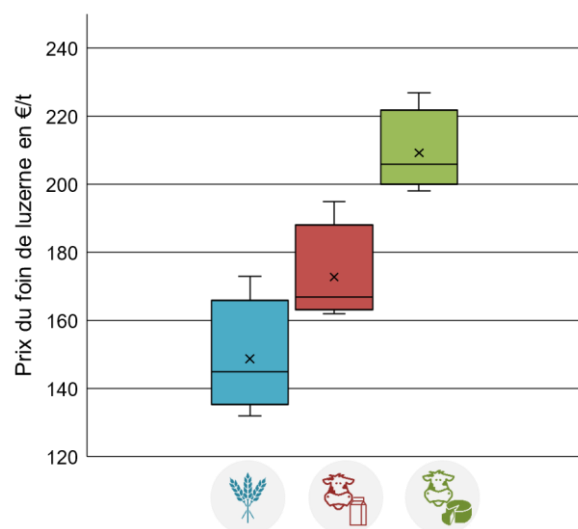


Figure 7 : Prix d'intérêt du foin de luzerne pour les deux exploitations en élevage et l'exploitation en grandes cultures (bleu : grandes cultures, rouge : lait standard, vert : lait IGP).

De plus, l'introduction de luzerne avec contrat permet, sur plusieurs années, une stabilisation relative du résultat courant de l'exploitation en grandes cultures, du fait de la diversification des ventes mais aussi des effets agronomiques de la luzerne. Ces premiers éléments pourraient permettre d'engager une réflexion plus globale à l'échelle des territoires pour assurer une plus grande résilience des systèmes de production.

3.5 Analyse des trajectoires des exploitations engagées dans la transition agroécologique

L'hypothèse testée est que la polyculture-élevage (PCE) représente un système favorable pour amorcer ou renforcer la transition agroécologique des exploitations agricoles. L'étude s'est intéressée aux discours d'agriculteurs en PCE ou ayant arrêté la PCE, sur la base d'enquêtes semi-directives en exploitations, afin d'explorer leurs motivations dans le choix de leur système et le lien qu'ils faisaient ou non avec cette transition que vit l'agriculture. La mise en œuvre technique de ces motivations a également été étudiée au travers de l'intensité du couplage des ateliers. Afin de capter une grande diversité de systèmes, et donc potentiellement d'organisations et de points de vue différents, le choix des agriculteurs enquêtés s'est appuyé sur la méthode boule de neige (Mitchell *et al.*, 1997).

Les discours ont été étudiés à travers trois analyses complémentaires. Une première analyse « biotechnique » a quantifié les références aux trois piliers de la durabilité (économique, social et environnemental) dans le discours des agriculteurs et dans la description de leur système. L'objectif était de voir si le choix d'un système PCE relevait de préoccupations liées à un ou plusieurs piliers de la durabilité et lesquels étaient privilégiés par l'agriculteur. Une deuxième analyse, sociologique, s'est appuyée sur la notion de « Modernité » au sens sociologique du terme (Latour, 1991), que l'on peut rapprocher d'une mise en avant de l'économie de marché, du productivisme et de la domination de la nature... Il s'agissait d'identifier les valeurs fondamentales de chaque agriculteur sur lesquelles il avait construit son système. Une troisième analyse plus technique et organisationnelle a schématisé et quantifié l'intensité des interactions entre les ateliers culture, élevage et prairie, via les couplages évalués avec l'outil NICC'EL (Martel *et al.*, 2020) en tant que mise en œuvre concrète des idées développées dans les discours et du positionnement des agriculteurs dans la transition agroécologique. Une approche graphique a permis de synthétiser l'ensemble des résultats sur un schéma permettant, de plus, de tracer les trajectoires des exploitations.

L'analyse biotechnique a permis de positionner les agriculteurs sur une échelle allant d'un niveau 1 où le pilier économique est largement prépondérant dans le discours à un niveau 6 où les références aux piliers économique, social et environnemental sont également très présentes. De la même manière, l'analyse sociologique a permis de positionner ces mêmes agriculteurs sur une échelle s'étendant d'un ancrage profond dans les valeurs modernes, relatives au monde productiviste, économique et marchand, à une forte remise en cause conduisant à l'affranchissement de ces valeurs. La projection de ces échelles sur deux axes a permis d'obtenir la position de chaque agriculteur sur un graphique modernité-durabilité (Figure 8).

Il ressort de cette approche une grande diversité de positionnements, avec 14 positions distinctes pour 26 agriculteurs enquêtés. Ces positions font ressortir une relation à tendance linéaire entre les préoccupations de durabilité et les valeurs sociales de référence (modernité) des agriculteurs. Plus les agriculteurs parlent conjointement des trois piliers de la durabilité et plus cela s'accompagne d'un changement de regard sur la nature et d'une remise en cause du système productiviste classique. Cela se traduit sur l'exploitation par une intensification des interactions, ou couplages, entre les ateliers élevage et culture et donc d'une augmentation de l'autonomie du système. Les exploitations les plus autonomes et les plus engagées dans la transition agroécologique ont quasiment toutes fait le choix de l'agriculture biologique. L'agriculture biologique ressort comme un moyen pour les agriculteurs de valoriser

l'intensification des couplages qu'ils ont progressivement mis en place. L'agriculture biologique semble une suite logique cohérente avec la re-conception de leurs systèmes.

L'estimation par les agriculteurs de leur positionnement sur ce même graphique 10 ans auparavant et dans 10 ans (Figure 8) a permis de dégager des trajectoires d'évolution. Globalement, les évolutions des agriculteurs vont toutes vers des profils plus durables (vers le haut de l'échelle) et soit en s'affranchissant de la modernité (trajectoires allant vers la droite) soit en restant ancrés dans la modernité (trajectoires restant à gauche). Du fait de l'échantillonnage réalisé selon la méthode boule de neige, cette approche permet d'appréhender la diversité des situations, mais ne permet pas d'évaluer la représentativité des diverses trajectoires.

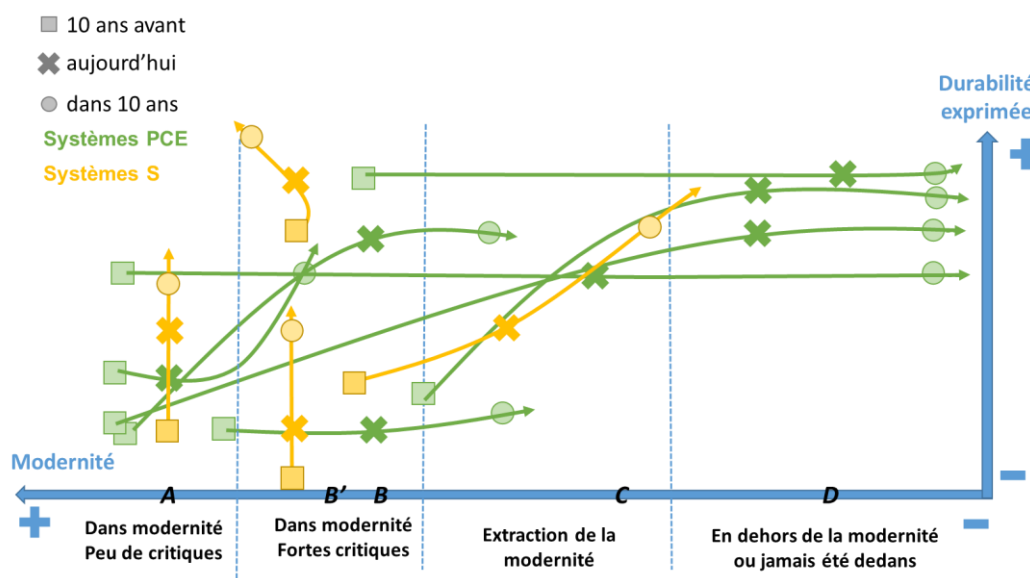


Figure 8 : Trajectoires types des exploitations enquêtées sur les 2 échelles de durabilité et modernité. Systèmes en polyculture-élevage (PCE : vert) et Systèmes spécialisés (S : jaune).

La PCE apparaît ainsi constituer un facteur favorable à la transition agroécologique puisqu'elle permet, en s'appuyant sur la complémentarité des cultures et de l'élevage, d'augmenter l'autonomie et la durabilité des exploitations agricoles et de faciliter leur évolution et la re-conception de systèmes. Bien qu'elle soit une voie privilégiée vers cette transition, une exploitation spécialisée pourra également augmenter sa durabilité en favorisant les processus agronomiques naturels et en s'appuyant sur les ressources dont elle dispose.

3.6 Rôle des collectifs dans la transition agroécologique

En polyculture-élevage les légumineuses fourragères sont régulièrement cultivées et intégrées aux rations alimentaires des animaux. 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 agriculteurs cultivant des légumineuses ont été interviewés (Garcia, 2018 ; Vergote *et al.*, 2019). Il est établi que l'insertion de nouvelles cultures nécessite une phase d'apprentissage facilitée par l'échange entre pairs (Rivaud et Mathé, 2011), ainsi des collectifs d'agriculteurs à vocation technique comme les GIEE ont été ciblés. Dès les années 1950, les collectifs ont ainsi constitué le fer de lance de la modernisation agricole (Gerbaux et Muller, 1984). Le choix des collectifs enquêtés s'est fait après concertation avec les acteurs du territoire (chambres d'agriculture, coopératives et DRAAF) par la méthode dite boule de neige (Mitchell *et al.*, 1997).

L'analyse des entretiens fait ressortir les apports cognitif et social 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, dans lequel le conseil technique 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 consciemment aux collectifs pour partager, aller chercher ou construire des connaissances et savoir-faire *ad hoc*. Les agriculteurs rencontrés 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 dans leur exploitation.

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 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. Toutefois, le choix de nouvelles cultures et l'appropriation de nouvelles pratiques agricoles résultent 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, des surcoûts liés à la sur-application des traitements, des rendements en baisse). Il peut également être aussi le fruit d'un heureux hasard (Carnoye *et al.*, 2019). Aujourd'hui, les collectifs de pairs n'engagent qu'une minorité d'agriculteurs (environ 10% dans les régions étudiées). Ce n'est pas forcément un problème si ces agriculteurs ont un rôle de « gatekeepers » ou « déverrouilleurs de porte » (Polge, 2015), c'est-à-dire s'ils jouissent d'une reconnaissance par leurs pairs en tant que professionnels que l'on peut suivre. 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) apporte ainsi une reconnaissance institutionnelle. L'enjeu se situe maintenant au niveau de la reconnaissance de cette démarche de transition par le tissu socio-économique.

3.7 Limites à l'introduction des légumineuses dans les systèmes de culture

L'approche croisée des différents résultats des deux projets de recherche ProSys et POEETE met en évidence l'intérêt de l'introduction de légumineuses en grandes cultures et en polyculture-élevage. La problématique de l'autonomie protéique au niveau des exploitations et également au niveau de territoires plus vastes passe par les questionnements abordés précédemment. En réduisant le recours aux engrais de synthèse, en améliorant la fertilité des sols, en « cassant » les cycles des adventices et des maladies, en augmentant le bilan protéique à l'hectare, en améliorant l'autonomie protéique des exploitations, ces cultures sont assez systématiquement envisagées dès que l'on raisonne un système de culture durable. 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). Comme précisé précédemment, 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 lixiviation des nitrates importante, parfois jusqu'à 18 mois après le labour. Pour minimiser ce risque de lixiviation il est possible d'introduire des cultures intermédiaires ou de choisir des cultures suivantes gourmandes en azote.

Concernant la dynamique des produits phytosanitaires, les résultats des expérimentations ne permettent pas de tirer des conclusions claires. Il semble toutefois que les risques soient surtout présents les semaines suivant l'application des produits, quelle que soit la culture, et que la réduction des usages se traduit par une réduction des substances phytosanitaires retrouvées dans les eaux.

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 des pluies prédite et l'allongement des périodes sèches pourraient favoriser la lixiviation des 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.

Conclusion

Les projets PSDR4 POEETE et ProSys ont traité de l'adaptation des systèmes de production agricole (animale et végétale) aux changements de contexte environnemental, agricole et social (climat, diminution des intrants, recherche d'autonomie), via notamment l'introduction des légumineuses, en s'intéressant aux différentes échelles (système de culture, exploitation agricole, filières et territoire), en prenant en compte des objectifs de diminution des intrants azotés de synthèse et de recherche d'autonomie en protéines. Ces projets ont permis l'acquisition de références locales pour l'optimisation de la fourniture de biens communs : production de matières premières végétale et animale, qualités de l'eau et de l'air, production de protéines, réduction des émissions de gaz à effet de serre. N'ayant pas vocation à présenter des recettes toutes faites, les études et expérimentations menées doivent permettre de formuler des questionnements pour favoriser la co-conception de solutions innovantes adaptées aux contextes social, économique et environnemental, valables localement. Les résultats présentés mettent en évidence l'intérêt de repenser les systèmes de production avec plus de liens entre polyculture et élevage, et l'intérêt d'augmenter la part des légumineuses dans les soles en région pour améliorer l'autonomie protéique tout en améliorant le niveau de fonctionnalité et de durabilité des agroécosystèmes. La réussite de ces évolutions vers des systèmes plus agroécologiques dépendra à la fois de la capacité à diffuser les résultats produits mais également de la possibilité de convaincre de l'intérêt de ces évolutions à tous les niveaux des filières agricoles et des territoires.

Remerciements

Les études présentées dans cet article ont reçu le soutien financier accordé par le 4^e programme PSDR (INRAE, Régions Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne-Rhône-Alpes, ANR Legitimes, PIA PeaMUST, Union Européenne / FEADER) dans le cadre des projets « POEETE et ProSys ». L'ensemble des publications relatives aux 33 projets du programme PSDR4 est consultable : <https://www.psdr.fr/>

Références bibliographiques

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.

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. doi.org/10.15454/fqye-3778
- Comifer, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Comifer, Paris, 160 p.
- Dee D.P. et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 553–597.
- Fosse J., Aussilloux V., Grémillet A., Mesqui B., 2019. Faire de la politique agricole commune un levier de la transition agroécologique. *France stratégie*, 31 p.
- 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., 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, 251 p.
- Guinet M., Nicolardot B., Voisin A.S., 2020a. Provision of contrasted nitrogen-related ecosystem services among grain legumes. *Agronomy for Sustainable Development* 40, 33.
- Guinet M., Nicolardot B., Voisin A.S., 2020b. Nitrogen benefits of ten legume pre-crops for wheat assessed by field measurements and modelling. *European Journal of Agronomy* 120, 126151.
- 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, 70 p.
- Isbell F., Calcagno V., Hector A., Connolly J., Harpole W.S., Reich P.B., Scherer-Lorenzen M., Schmid B., Tilman D., Van Ruijven J., 2011. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* 477:199–202.
- Köpke U., Nemecek T., 2010. Ecological services of faba bean. *Field Crop Research* 115, 217-233.
- Latour B., 1991. Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique, Paris, La Découverte. 210 p.
- Lecomte C., Giraud A., Aubert V., 2003. Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat in natural conditions. *Agronomie* 23, 51-66.
- Martel G., Ramette C., Bouvarel I., Buteau A., Fontanet J.M., Mischler P., 2020. NiCC'El. Un outil pour caractériser le niveau d'interaction entre cultures et élevage d'une exploitation et identifier les voies d'amélioration. *Innovations Agronomiques* 80, 33-40. doi.org/10.15454/pkpw-8e95
- 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.
- Mosnier C., Duclos A., Agabriel J., Gac A., 2017. Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems*, 157, 202-215.
- 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.

Power A.G., 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philos Trans R Soc B* 365:2959–2971.

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., 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.

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.

Solanet G., Levard LM., Castellanet C., 2011. L'impact des importations européennes de soja sur le développement des pays producteurs du Sud. Campagne Alimenterre. CFSI, GRET, AFAC, 95 p.

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.

Sleutel S., De Neve S., Németh T., Tóth T., Hofman G., 2006. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*, 25(3), 280-288.

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.

Thiery E., Brunschwig G., Veyssset P., Mosnier C., 2020. Mise en place d'une filière foin de luzerne valorisant les complémentarités plaine-montagne : détermination du prix d'intérêt pour le producteur et les acheteurs. *Renc. Rech. Ruminants*, 2020, 25, 326-329.

Tibi A., Therond O., 2017. Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFSE. 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. [dx.doi.org/10.15454/vrxqlw](https://doi.org/10.15454/vrxqlw)

Voisin A.S., Guéguen J., Huyghe C., Jeuffroy M.H., Magrini M.B., Meynard J.M., Mougél C., Pellerin S., Pelzer E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agron Sustain Dev* 34:361–380.

Ziegler D., Héduit M., 1991. Engrais de ferme : valeur fertilisante, gestion, environnement. ITCF et ITP, Paris, 35 p.

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)