



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les
Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.fr



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)7.69.81.16.62 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Rôle des légumineuses pérennes dans une agriculture agroécologique

B. Julier¹, G. Louarn¹

La transition vers une agriculture agroécologique est une nécessité. Parmi les différents leviers à actionner, les légumineuses pérennes sont essentielles.

RESUME

Les légumineuses sont indispensables pour fournir des produits riches en protéines et introduire de l'azote dans les systèmes de culture. Les espèces pérennes, essentiellement cultivées pour une production fourragère, mais aussi comme plantes de services, contribuent à l'autonomie protéique des élevages. Les légumineuses pérennes contribuent aussi à de nombreux autres services écosystémiques : fertilité des sols grâce à la fourniture d'azote couplé à la matière organique, gestion des adventices, réduction des pollutions émises par les élevages de ruminants, préservation de la biodiversité. Capables de s'adapter au changement climatique, les légumineuses pérennes restent précieuses sous différents scénarios de transition alimentaire. L'article suggère des pistes de recherche en agronomie, amélioration des plantes et zootechnie pour accroître encore ces services.

SUMMARY

Role of perennial legumes in the transition towards agroecology

Legumes are essential for providing protein-rich products and introducing nitrogen into cropping systems. Perennial species, mainly grown for fodder production but also as service plants, contribute to the protein autonomy of livestock. Perennial legumes also contribute to many other ecosystem services: soil fertility through the supply of nitrogen coupled with organic matter, weed management, reduction of pollution emitted by ruminant livestock, and biodiversity preservation. Able to adapt to climate change, perennial legumes remain valuable under different food transition scenarios. The article suggests avenues of research in agronomy, plant breeding and animal husbandry to further increase these services.

Les enjeux majeurs d'une agriculture agroécologique sont de minimiser les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement. Plusieurs objectifs sont identifiés : maintenir la production agricole, réduire l'utilisation de l'énergie fossile et des autres ressources naturelles, réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), réduire ou stopper l'usage des pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) et préserver la biodiversité. Pour ce faire, l'agroécologie vise à développer des pratiques agricoles valorisant la diversité biologique et les processus de régulation naturels (couplage des cycles des nutriments tels que l'azote, le carbone, le phosphore et de l'eau, équilibres biologiques entre bioagresseurs et organismes auxiliaires des cultures, etc...). Un principe de base de l'agroécologie est l'allongement des rotations des cultures, notamment grâce à la diversification des espèces qui y sont introduites. Au-delà du développement de cette agriculture plus vertueuse, un enjeu stratégique majeur est d'assurer notre sécurité

alimentaire, qui requiert des productions agricoles végétales et animales moins dépendantes des intrants. La guerre en Ukraine nous rappelle que les engrais azotés de synthèse sont largement produits grâce à du gaz fossile russe.

1. Les légumineuses, espèces indispensables à la transition agroécologique

Les légumineuses (ou fabacées) sont des espèces de choix pour cette diversification : en fixant naturellement l'azote atmosphérique (N₂) disponible sans limite (80 % de l'air) grâce à une symbiose avec des bactéries du sol, elles permettent de transformer ce N₂ en ammonium, assimilé par les plantes pour synthétiser des acides aminés, composants des protéines. Une agriculture sans légumineuses repose au contraire sur des engrais azotés de synthèse, où l'azote

AUTEURS

1 : INRAE, P3F, F-86600 Lusignan, France. bernadette.julier@inrae.fr, 05 49 55 60 38

MOTS-CLES : Fabacée, protéine, azote, variété, élevage, service écosystémique

KEY-WORDS : Fabacea, protein, nitrogen, livestock, ecosystem service

REFERENCE DE L'ARTICLE : Julier B., Louarn G., (2022). « Rôle des légumineuses pérennes dans une agriculture agroécologique ». *Fourrages* 251, 17-25

atmosphérique est également transformé en ammonium, ce qui nécessite une dépense importante de gaz fossile, avec émission de CO₂ (procédé Haber-Bosch réalisé dans des usines classées Seveso). Dans de tels systèmes, même si des effluents d'élevage sont épandus, l'entrée d'azote est assurée par ces engrais de synthèse. De plus, leur utilisation libère des gaz à fort effet de serre tels que les oxydes d'azote (N₂O surtout). **En remplaçant l'usage des engrais azotés par la culture de légumineuses, on réduit donc à la fois la consommation en énergie fossile et l'émission de GES.** De tels effets nécessitent évidemment une proportion importante de légumineuses dans la sole. L'azote fixé par la légumineuse est prioritairement utilisé pour sa propre croissance, mais une portion est relarguée dans le sol (rhizodéposition), par sénescence de racines ou de nodules ou par exsudation, et disponible pour d'autres espèces cultivées avec la légumineuse (co-cultures ou mélanges, par exemple luzerne-dactyle pour des fourragères, ou pois-blé pour des cultures de rente). Les cultures qui succèdent à la légumineuse dans la rotation bénéficient des reliquats azotés (racines, tiges, feuilles selon les espèces). De nombreuses études montrent en effet que les reliquats laissés par une culture de légumineuses pérennes bénéficient aux cultures suivantes (Cohan, 2012). De ce point de vue, toutes les légumineuses ne se valent pas, et l'effet précédent des légumineuses pérennes est notoirement fort (Vertès *et al.*, 2015).

Pour les systèmes agricoles, les légumineuses permettent donc d'assurer une production de protéines mais aussi une entrée d'azote organique grâce à la fabrication de matières organiques riches en azote et en carbone. En contribuant à l'indispensable diversification des cultures (Meynard *et al.*, 2013), elles fournissent de nombreux autres services non détaillés ici. Différentes perspectives indiquent d'une agriculture non dépendante d'engrais azotés de synthèse requiert environ 25 % des surfaces cultivées avec des légumineuses (Poux et Aubert, 2018), soit 7.5 millions d'hectares pour une surface agricole utile de 29 millions d'hectares, dont les 2/3 devraient être des prairies de légumineuses ou multi-espèces.

Une hausse des surfaces de légumineuses, utilisées comme cultures fourragères ou de rente ou comme plantes de service, en culture pure ou associée, est susceptible de générer des « disservices » écosystémiques. Parmi ces risques, l'émergence de nouvelles problématiques sanitaires sur légumineuses ou le développement de maladies ou ravageurs déjà connus peuvent notamment entraver le développement de ces cultures. Il est important d'avoir une conception raisonnée des systèmes de culture avec des légumineuses (choix des espèces, choix des variétés au sein des espèces, et fréquences de retour) afin d'éviter ces difficultés. Par ailleurs, il est important que ces disservices sanitaires ne soient pas exportés en même temps que la culture de légumineuses est déportée dans d'autres régions, par exemple à cause d'excès de

légumineuses dans les rotations. Par ailleurs, les systèmes diversifiés à l'échelle de la parcelle, associant plusieurs espèces fourragères ou de rente, sont par ailleurs des **systèmes plus complexes** à conduire. Ils permettent une certaine assurance de production face aux aléas, mais sont aussi plus difficilement pilotables en cours de culture (interactions entre espèces sensibles au timing des interventions ; options réduites de recours à certains intrants pour le contrôle des adventices). Enfin, jusqu'à présent, les cultures de légumineuses, et surtout les protéagineux, sont souvent **économiquement moins rentables** que les céréales et les oléagineux, dans des conditions où les engrais azotés gardent un prix raisonnable et les autres services écosystémiques ne sont pas valorisés.

2. Les atouts supplémentaires des légumineuses pérennes

Les services rendus par les légumineuses fourragères, en réponse aux enjeux posés par une agriculture agroécologique sont illustrés en figure 1. Ils s'intègrent dans la notion « One Health » ou « une seule santé », de l'humain, des animaux et de l'environnement (<https://www.inrae.fr/alimentation-sante-globale/one-health-seule-sante>).

2.1. Une production de protéines maximale permettant une autonomie protéique des élevages de ruminants

Les légumineuses pérennes sont essentiellement utilisées pour leur production de fourrage riche en protéines, utilisé dans la ration des ruminants. En cultures pures (prairies artificielles) ou en mélanges avec des graminées (prairies temporaires), pendant deux à cinq ans, elles vont rester en place, sans autres interventions que des récoltes successives. Avec un rendement moyen observé en France d'environ 10 t/ha, une luzerne pure produit plus de protéines par hectare que les protéagineux.

Actuellement, l'élevage de ruminants utilise largement l'ensilage de maïs, riche en énergie mais pauvre en protéines, qui est complété par du tourteau de soja importé. Cette dépendance, problématique d'un point de vue stratégique, est source d'incertitude financière sur des marchés mondiaux marqués par une forte demande chinoise (Gale *et al.*, 2019). Elle génère aussi des impacts environnementaux majeurs, dont la déforestation massive et un usage intensif d'herbicides en Amérique du Sud. Pourtant, l'autonomie protéique des élevages de ruminants pourrait être obtenue en diminuant de moitié l'ensilage de maïs qui serait remplacé par du fourrage issu de prairies riches en légumineuses et de céréales (Pfmilin *et al.*, 2021).

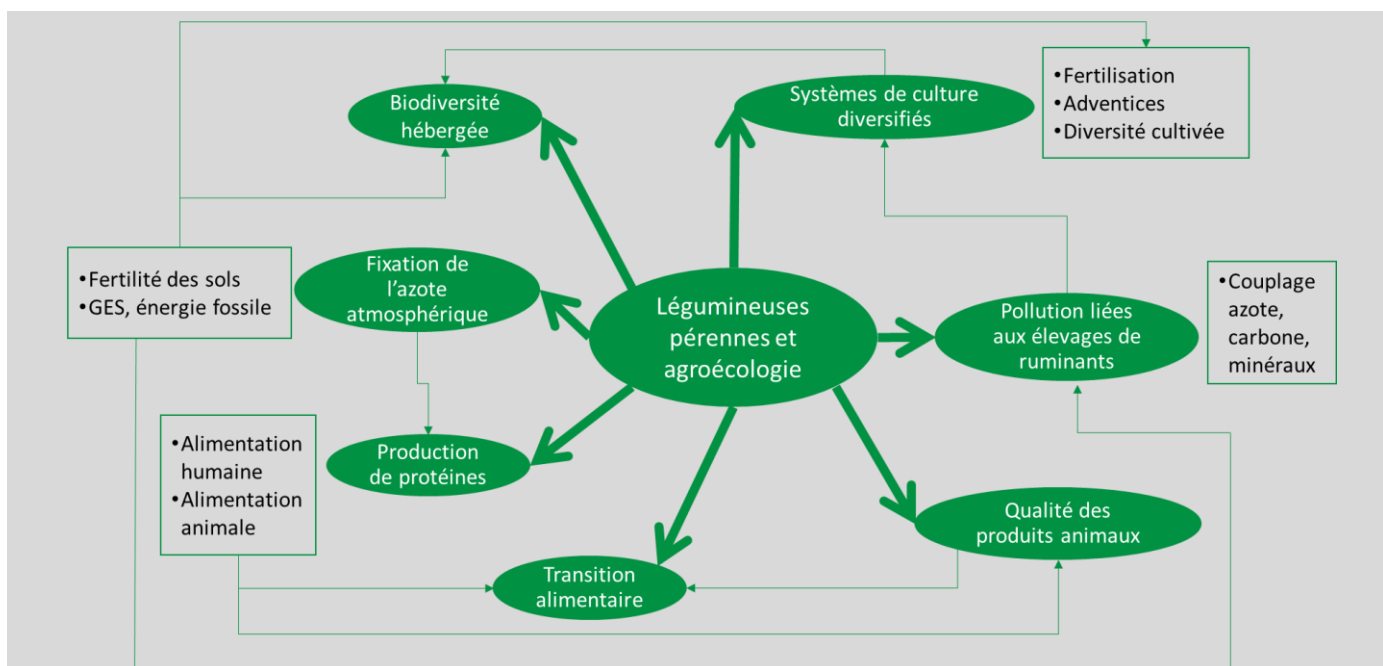


FIGURE 1 : Intérêts des légumineuses pérennes dans une agriculture agroécologique, en illustrant les services fournis (enveloppes en vert) permettant de répondre aux enjeux de l'agriculture (encadrés). Les flèches montrent les dépendances entre services et enjeux.

Figure 1 : *Interests of perennial legumes in agro-ecological agriculture, illustrating the services provided (green envelopes) to meet the challenges of agriculture (boxes). The arrows show the dependencies between services and challenges.*

2.2. Services de fertilité des sols

Les légumineuses fourragères fixent des quantités importantes d'azote atmosphérique, jusqu'à 300 à 400 kg/ha/an pour de la luzerne. Entre 100 et 200 kg d'azote/ha sont ensuite restitués aux cultures suivantes, essentiellement en première année mais pour partie aussi en deuxième année (Julier *et al.*, 2017). La quantité d'azote fixée dépend pour l'essentiel de la biomasse accumulée, laquelle dépend de l'espèce et des conditions de croissance (Louarn *et al.*, 2016). Il est important de noter que les prairies temporaires assurent des services de fixation à hauteur de 25-46 kg d'azote/t de matière sèche de légumineuse produite. Une proportion d'au moins 30 % de légumineuses devrait être visée dans les prairies multi-espèces (Nyfeler *et al.*, 2011). L'apport d'azote par la fixation symbiotique des légumineuses est « couplé » à un apport en carbone issu de la photosynthèse et en autres minéraux (phosphore, potassium), au contraire des apports d'azote minéral, non directement couplés à une fixation de carbone. Grâce à ce couplage entre l'azote, le carbone et les autres éléments de la matière organique, au-delà de la fourniture d'azote aux cultures suivantes de la rotation sur la même parcelle, les légumineuses contribuent à recycler les minéraux vers les autres parcelles de l'exploitation, ou hors de l'exploitation par les fumiers et autres déjections animales.

Les différentes espèces ont des fonctionnements contrastés. La rhizodéposition (ou quantité d'azote déposé dans le sol) est beaucoup plus élevée pour le

trèfle blanc, par exsudation et par renouvellement des racines et des nodules, que pour la luzerne (Louarn *et al.*, 2016).

Les pertes d'azote pendant la culture ou après la destruction d'une prairie de légumineuses sont très faibles. En effet, le couplage réalisé entre l'azote, le carbone et les minéraux lors de la fixation symbiotique des légumineuses, contribue à piéger l'azote dans la matière organique. Cet azote risque peu d'être perdu, contrairement à l'azote minéral, non directement couplé à une fixation de carbone, et de ce fait, fréquemment perdu par lixiviation ou par dénitrification (Lemaire, 2014).

2.3. Services environnementaux

◆ Gestion des adventices

Dans des systèmes où les rotations incluent des cultures annuelles et des prairies de légumineuses, les adventices problématiques pour les cultures annuelles (espèces annuelles à larges feuilles, à port érigé ou grimpant) disparaissent lors de la culture prairiale, sous l'effet des fauches successives (Meiss *et al.*, 2010). Réciproquement, les adventices spécialisées des cultures pérennes (dont des espèces pérennes ou des annuelles à port en rosettes), sont facilement éliminées des cultures annuelles (Meiss *et al.*, 2010).

L'utilisation de légumineuses initialement fourragères pour un usage de plantes de services (écosystémiques) a émergé depuis quelques années (Leclercq *et al.*, 2017). Les légumineuses pérennes font

l'objet de tests agronomiques, dans lesquelles elles sont cultivées en compagnie de cultures de rente (céréales, colza...). Elles assurent alors un couvert pérenne ou « mulch vivant », dont le rôle est principalement de limiter le développement des adventices, et donc l'usage d'herbicides, tout en permettant un apport significatif d'azote (Labreuche, 2017). La luzerne semble être une espèce prometteuse. Ce nouvel usage requiert encore des efforts en terme de choix des espèces, de pratiques culturales (Hélias, 2019) et de sélection de variétés adaptées à cet usage (figure 2).



FIGURE 2 : Luzerne utilisée comme mulch vivant pour la culture de blé d'hiver. Test de populations de luzerne (2 mai 2022) à l'INRAE, UR3P Lusignan.
Figure 2 : Lucerne used as living mulch for winter wheat cultivation. Test of lucerne populations (2 May 2022) at INRAE, UR3P Lusignan.

L'évolution récente du catalogue français vers une évaluation des variétés (VATE) sous la rubrique « Usage en plante de services » est favorable à des innovations génétiques dans ce domaine (Leclercq *et al.*, 2017).

◆ Réduction des pollutions émises par les élevages de ruminants

Les élevages de ruminants sont souvent pointés du doigt pour l'émission de méthane, un GES, lors de la rumination et par le rejet d'effluents riches en azote, dont la lixiviation est plus probable lorsqu'il est rejeté par l'urine que par les fèces.

Le rôle relatif des teneurs en fibres et en azote de la ration, apportées par différentes espèces végétales, sur les émissions polluantes (depuis la culture, l'utilisation par les ruminants jusqu'au devenir des effluents) est difficile à identifier, et les bilans dépendent des métriques utilisées (par animal, par litre de lait, par litre de lait corrigé par les teneurs en lipides et en protéines) (Uddin *et al.*, 2020). Les légumineuses pérennes dont le fourrage est riche en tannins condensés (lotier, sainfoin) réduisent la proportion d'azote excrété dans les urines (Mueller-Harvey *et al.*, 2019). Ces tannins limitent la dégradabilité des protéines dans le rumen. Des études montrent que les

saponines (telles que celles contenues dans la luzerne) limitent la population de protozoaires dans le rumen et par conséquence l'émission de méthane (Niderkorn et Baumont, 2009).

◆ Préservation de la biodiversité

La relation positive entre la diversité cultivée, à l'échelle des rotations et des parcelles, sur le service de régulation des ravageurs est bien établie (Rusch *et al.*, 2013). Alors que les prairies confirment leurs intérêts agronomiques et zootechniques (Protin *et al.*, 2014). Les capacités des prairies multispécifiques à fournir des ressources pour les pollinisateurs sont avérées et le rôle des légumineuses pérennes pour ce service est confirmé (Cong *et al.*, 2020). De nombreuses études ont été menées sur des parcelles de luzerne et montrent qu'elles hébergent une diversité d'organismes proies ou prédateurs, tels que des insectes, des petits mammifères et des oiseaux. Des pratiques de gestion respectueuses de l'environnement accroissent nettement ces populations (Julier *et al.*, 2017; Thiébeau *et al.*, 2010). Des recommandations à laisser des bandes non fauchées sont proposées pour favoriser ainsi l'accueil d'insectes et d'oiseaux (<https://www.luzernes.org/biodiversite-une-seconde-nature-pour-la-luzerne/>).

◆ Qualité des produits animaux et santé animale

Différentes études montrent que des rations à l'herbe permettent de réduire la proportion en acides gras saturés dans les produits animaux pour mieux approcher les recommandations de santé (Duru et Magrini, 2017). Les teneurs en acides gras insaturés des fourrages sont variables, mais l'effet de l'espèce fourragère sur la teneur en acides gras insaturés n'est pas complètement claire (Dierking *et al.*, 2010). Néanmoins, les légumineuses riches en tannins ou le trèfle violet qui contient de la polyphénol oxydase, grâce à leur dégradabilité des protéines plus faibles, permettent de produire du lait ou de la viande enrichis en acides gras insaturés (Dierking *et al.*, 2010; Mueller-Harvey *et al.*, 2019).

Par ailleurs, les tannins condensés contenus dans le sainfoin ou le lotier semblent réduire le parasitisme intestinal des petits ruminants au pâturage (Rivaroli *et al.*, 2019). La santé des ruminants est aussi globalement améliorée par des rations riches en légumineuses fourragères qui limitent les risques d'acidose, grâce à un pouvoir tampon conféré par la richesse en calcium (Guillemot *et al.*, 2019).

◆ Adaptation au changement climatique

Toutes les cultures sont concernées par le changement climatique, mais dans le cas des légumineuses, un impact de la sécheresse et des fortes températures sur les bactéries fixatrices d'azote et la fixation symbiotique peut être envisagé (Elbouthahiri *et*

al., 2010). Pour des espèces pérennes, il peut d'ailleurs y avoir une contradiction entre la production en condition de sécheresse et la survie (Volaire *et al.*, 2016). Il existe de nombreuses espèces de légumineuses pérennes, dont les adaptations aux pédoclimats sont connues (voir par exemple : <http://www.prairies-gnis.org/>). L'agriculteur peut néanmoins faire face à des difficultés pour s'approvisionner en semences d'espèces mineures, mais le trio luzerne – trèfle violet – trèfle blanc permet de faire face à une majorité des conditions françaises, même si le lotier et le sainfoin sont plus tolérantes à la sécheresse. Face au changement climatique, la création variétale est un levier pour mettre à disposition des variétés adaptées à la sécheresse (Annicchiarico *et al.*, 2011; Erice *et al.*, 2011).

Dans certaines régions d'une grande moitié nord de l'Europe, le changement climatique peut être vu comme un atout pour la diversification, avec une meilleure adaptation de certaines espèces de légumineuses vers le nord permettant d'accroître l'autonomie protéique de ces régions. On peut citer des évaluations de variétés de luzerne en cours en Norvège (<https://www.norsok.no/en/projects/2021/diversifyin-g-organic-crop-production-to-increase-resilience-diversilience>). Il s'agit de faire coïncider les périodes de végétation avec les périodes où les températures sont clémentes. Pour la luzerne, la dormance automnale, en réponse à la durée du jour (Blondon *et al.*, 1967), est un levier qui permet de choisir des variétés en fonction de leur capacité de croissance au printemps et en automne. De même pour le trèfle violet, les variétés diffèrent pour leur date de démarrage au printemps.

Le changement climatique est aussi associé à une hausse de la teneur en gaz carbonique (CO₂). Des simulations montrent une hausse du rendement fourrager de la luzerne à moyen terme (2020-2040) et long terme (2060-2080) (Rugé *et al.*, 2013; Zaka, 2016). Ces résultats s'expliquent par une augmentation de la teneur en CO₂ qui compense les effets négatifs de la hausse des températures et du stress hydrique sur le rendement et la fixation de l'azote atmosphérique.

Le rôle pivot des légumineuses dans les systèmes de culture ne se dément pas en condition de changement climatique, la disponibilité d'un grand nombre d'espèces cultivées de légumineuses et de nombreuses variétés adaptées à un grand nombre de conditions climatiques est indispensable.

◆ Légumineuses fourragères et transition alimentaire ?

Plusieurs études mentionnent la nécessité d'adopter une alimentation dont les apports protéiques sont assurés majoritairement par des végétaux (Asal *et al.*, 2017). Dans ce contexte, les légumineuses fourragères, qui alimentent essentiellement des ruminants, ont-elles une place dans l'agriculture de demain ? Deux éléments permettent de répondre positivement à cette question (Magrini et Julier, 2019; Poux et Aubert, 2018). D'une part, les régimes

s'orientent plutôt vers du flexitarisme que du végétarisme, requérant donc des productions animales. D'autre part, les services écosystémiques fournis par des cultures prairiales riches en légumineuses dans les rotations sont incontournables. Les ruminants sont les animaux les plus capables de valoriser la biomasse prairiale. Dans une perspective de réduire la part de protéines animales dans l'alimentation humaine, toutes les productions animales seraient réduites, mais plus celles issues de monogastriques que de ruminants (Poux et Aubert, 2018). Cependant, si les sociétés évoluaient vers un végétarisme majoritaire et que les besoins en produits animaux chutaient, il faudrait malgré tout poursuivre la culture de légumineuses pérennes dans les rotations. Deux valorisations de la biomasse seraient alors envisageables en extrayant d'une part les molécules « nobles » (protéines) pour des usages alimentaires et en valorisant les coproduits fibreux à faible valeur alimentaire pour produire de l'énergie ou des biocomposés. Les protéines foliaires, composées essentiellement de deux enzymes de photosynthèse et extraites à partir de la biomasse végétative, ont une composition en acides aminés proche des recommandations de l'OMS (<https://www.luzernes.org/une-rd-ambitieuse/>), intéressante et stable.

◆ Disservices

Les disservices mentionnés plus haut s'appliquent bien évidemment aux légumineuses pérennes, fourragères ou de service. La moindre rentabilité économique est certainement à relativiser puisque les cultures fourragères contribuent à une autonomie des élevages et à une forme de sécurisation de l'alimentation des troupeaux. Néanmoins, les éleveurs mentionnent fréquemment les aléas liés à la conservation du fourrage après la récolte : des durées de séchage trop longues pouvant altérer la qualité du foin, ensilage parfois difficile selon les espèces, déshydratation coûteuse en énergie et non disponible localement.

3. Quelle recherche sur les légumineuses fourragères pour la transition agroécologique et la sécurité alimentaire ?

Plusieurs leviers doivent être activés simultanément pour offrir des espèces, des variétés, des techniques culturales et des débouchés, pour profiter pleinement des services attendus des légumineuses fourragères, dont une production fourragère riche en protéines et la fourniture d'azote.

3.1. La diversité des espèces

La simplification de l'agriculture n'a pas épargné les légumineuses pérennes, ni en surfaces, ni en diversité spécifique. Alors que les prairies artificielles représentaient plus de 3.5 millions d'hectares dans les

années 1940 ou 50 (sans comptabiliser les prairies temporaires qui comportaient très généralement des légumineuses aussi), il n'y a plus qu'environ 350 000 ha désormais en France, même s'il y a une légère tendance à la hausse ces dernières années. Les espèces utilisées étaient largement diversifiées, et aux trois majeures de notre époque (luzerne, trèfle violet, trèfle blanc), s'ajoutaient le sainfoin (800 000 ha en 1940), le lotier, la coronille. Dans les années 1960, au commencement des efforts de sélection génétique, des études ont été menées pour comparer les avantages des différentes espèces (Mansat, 1969) sur des critères de productivité, pérennité, adaptation aux contraintes de sécheresse. La productivité remarquable de la luzerne et du trèfle violet en culture pure a alors conduit à axer les efforts de recherche sur ces deux espèces. L'intérêt particulier du trèfle blanc pour un usage de pâture avait aussi été noté, ce qui a conforté aussi sa place en tant que légumineuse fourragère incontournable (Lenoble, 1964; Pochon, 2008). Les autres espèces, malgré la mise en évidence de leurs intérêts de tolérance à la sécheresse ou de rusticité (Berthet, 1970; Lenoble et Porcheron ; 1970), et plus récemment de leurs intérêts zootechniques liés par exemple aux tannins condensés, ont été progressivement délaissées, que ce soit par la recherche, le développement ou la sélection. L'étroitesse des marchés et leur faible rentabilité continuent à restreindre les efforts sur ces espèces, plus encore que sur les autres légumineuses fourragères. D'autres freins sont notables comme une production de semences insuffisante. Sur le sainfoin, ce caractère qui avait déjà été noté dans les années 1950 (Angevain et Prospero, 1995) comme étant difficile et coûteuse, n'a pas été amélioré, d'autant que les efforts en génétique ou en techniques de production de semences ont été confidentiels. Il n'en reste pas moins que **la diversité des espèces de légumineuses permet de les cultiver dans des conditions pédo-climatiques régionales très variées**. Un besoin important pour soutenir la diversification, et le redéploiement de ces espèces actuellement « orphelines » de recherche est de parvenir à produire les **référentiels de connaissances** sur les comportements agronomiques et écologiques comparés de ces légumineuses, comme analysé sur la morphogénèse par (Faverjon *et al.*, 2017). Les **innovations testées par les agriculteurs** devraient être plus systématiquement recherchées et partagées.

3.2. L'amélioration des variétés

Les légumineuses pérennes recèlent une **diversité génétique** importante permettant des adaptations larges. Outre les variétés actuelles (<https://www.herbe-book.org/>), anciennes et les populations de pays (Julier, 1996), une diversité supplémentaire est disponible dans les centres de ressources biologiques comme au CRB de l'INRAE à Lusignan (<https://urgi.versailles.inra.fr/siregal/siregal/grc.do>) ou ailleurs dans le monde (par exemple, en Europe : ECPGR

(<https://www.ecpgr.cgiar.org/resources/germplasm-databases/ecpgr-central-crop-databases>), aux Etats-Unis : USDA (<https://www.ars-grin.gov/Pages/Collections>). De plus, toutes ces espèces sont encore représentées à l'état sauvage dans certaines parties du monde. Dynamique de végétation dans l'année (ou dormance automnale pour la luzerne), tolérance à des stress biotiques ou abiotiques, qualité du fourrage, pérennité, sont autant de caractères travaillés activement par les sélectionneurs qui contribuent ainsi à la diversité des variétés inscrites au catalogue officiel.

Les **ressources génétiques** permettent de progresser lorsque de nouveaux caractères sont introduits dans les programmes de sélection pour s'adapter aux pressions (ravageurs, sécheresse) ou aux nouveaux usages (culture en mélange avec des graminées, culture comme plantes de service), améliorer la qualité du fourrage (teneur en protéines, digestibilité, composés secondaires comme les saponines et les tannins), valeur environnementale (pollinisation, fixation de carbone, restitution d'azote, réduction de l'émission de gaz à effet de serre). Nécessairement, et ceci requiert souvent des études, ces caractères (ou des « proxys ») doivent pouvoir être mesurés aisément sur un grand nombre de génotypes à un coût raisonnable pour entrer dans un programme de sélection.

La sélection, basée sur une évaluation phénotypique, doit désormais augmenter son efficacité, évaluée en termes de progrès génétique par unité de temps. Les **outils de la sélection moléculaire** ont récemment montré tous leurs intérêts pour la sélection de la luzerne et du trèfle violet (Julier *et al.*, 2021). Les marqueurs moléculaires révélés en grand nombre permettent de renouveler la connaissance de la diversité génétique, de détecter des marqueurs associés aux caractères sélectionnés et à construire des équations de prédiction génomique. Comme pour les principales espèces végétales et animales, les outils sont désormais disponibles pour accélérer le progrès génétique sur les principales espèces.

Pour les espèces mineures, des programmes de création variétale ciblés sur un ou deux caractères critiques pourraient permettre de réaliser les progrès génétiques indispensables. Très souvent, la production de semences est le frein majeur. En outre, la génétique translationnelle pourrait ouvrir des pistes : des gènes ou des marqueurs expliquant une part de la variation dans une espèce proche pourrait être utilisables sur ces espèces mineures.

Que ce soit pour les légumineuses majeures ou mineures, un **soutien à la sélection** est indispensable, que ce soit par des subventions ou par des partenariats publics-privés. Le secteur public pourrait d'ailleurs être missionné pour assurer la création variétale des espèces mineures et, pour les espèces majeures, la création de variétés améliorées pour la fourniture de services (aptitude à l'association, composition biochimique, etc.)

dans une phase préalable à leur développement à plus grande échelle.

3.3. Renouveler les systèmes de culture et d'élevage

Dans des exploitations de polyculture-élevage, les rotations entre cultures annuelles et les prairies sont pratiquées de façon systématique. En revanche, dans les exploitations de grandes cultures, les raisons d'introduire des prairies disparaissent, ainsi que les services qu'elles procurent. Des schémas d'organisation collective entre agriculteurs et éleveurs ont vu le jour à l'échelle de petits territoires (voir par exemple les résultats du projet Luz'Co <https://luzco.fr/le-projet-luzco/>). Dans des collectifs plus ou moins larges, la culture, la récolte, le séchage sont partagés et des procédures d'échanges entre les acteurs sont proposées. Le collectif progresse pas à pas pour optimiser l'organisation. Des efforts de re-conception des systèmes de culture (Berthet *et al.*, 2014) et d'élevage (Peyraud *et al.*, 2019) sont donc indispensables.

Le développement de systèmes de culture innovants peut aussi s'appuyer sur diverses approches d'expérimentation et de modélisation qui peuvent alimenter les démarches de co-conception (Gaudio *et al.*, 2022). La modélisation assure un rôle essentiel **pour permettre de projeter dans le temps long et à des échelles larges** (territoire, région, global) les impacts des adaptations testées tout en considérant un certain nombre de contraintes biologiques, physiques ou économiques (tests de scénarios). Les travaux de modélisation sur les légumineuses sont moins avancés et moins robustes que sur les grandes cultures céréalières (par exemple, un seul exercice pilote existe sur les légumineuses dans l'initiative AGMIP d'inter-comparaison de modèles, sur soja ; <https://agmip.org/>). Des modèles de cultures [comme STICS, (Brisson *et al.*, 2008)] permettent à présent de simuler certaines légumineuses pérennes comme la luzerne (Strullu *et al.*, 2020). Le spectre des légumineuses prises en charge par ces modèles reste cependant à élargir, tout comme les modalités d'introduction des légumineuses prise en charge, par exemple en associations plus ou moins diversifiées (Louarn *et al.*, 2020).

3.4. Recommandations des variétés dans des itinéraires de culture variés

L'accroissement des surfaces et des usages des légumineuses fourragères nécessite un renforcement de l'accompagnement technique. Les tests post-inscriptions des variétés sont rares en France, à part pour la luzerne destinée à la déshydratation (voir http://www.culture-luzerne.org/wp-content/uploads/2021/09/21006-circulaire-If-n%C2%B0203-varietes.pub_-1.pdf). La réalisation de tels tests sont très démonstratifs mais coûteux. Une bonne valorisation de ces essais nécessite une

coordination entre les acteurs (semenciers, chambres d'agriculture, instituts techniques) pour combiner les résultats.

Désormais, des modèles de culture (Brisson *et al.*, 2008) existent pour prédire les rendements, les teneurs en protéines et même les reliquats azotés des principales espèces cultivées et de certaines légumineuses fourragères en fonction du sol et de données climatiques actuelles ou prévues. En incluant des paramètres liés aux variétés, des simulations de rendement peuvent être obtenues à des échelles locales. Sur cette base, des recommandations variétales régionalisées et des cartes d'adaptation des variétés pourraient être produites. Ces modèles permettent aussi de simuler des rythmes de coupe variés (Strullu *et al.*, 2020). L'amélioration continue de ces modèles offre la possibilité de tester la performance des types variétaux dans différentes conditions pédoclimatiques, avec différentes pratiques. La réalisation des cartes de rendement et l'appropriation de ces outils de modélisation permettrait des tests « *in silico* » d'options variées d'espèces, variétés, lieux et itinéraires techniques.

Les légumineuses pérennes sont souvent cultivées dans des mélanges d'espèces plus ou moins complexes. Les **règles d'assemblages** (choix d'espèces) sont relativement bien connues pour permettre d'améliorer les performances agronomiques et surtout environnementales, en particulier en limitant les intrants (AFPF, 2017a, AFPF, 2017b). Le choix variétal est largement moins documenté même si des travaux montrent l'existence d'une diversité génétique (Maamouri *et al.*, 2017; Meilhac *et al.*, 2019).

Conclusion

La place des légumineuses pérennes dans une agriculture agroécologique, permettant de sécuriser la production de protéines en diminuant la dépendance aux engrais azotés de synthèse est désormais bien établie. Les services d'approvisionnement en énergie et en protéines pour les élevages de ruminants, l'entrée d'azote organique dans les systèmes agricoles et les multiples services environnementaux montrent que les surfaces de prairies riches en légumineuses doivent augmenter pour atteindre 15 à 20 % des surfaces arables. Pour atteindre ce niveau, des efforts sont nécessaires de la part de tous les acteurs.rice.s de la recherche, du développement, du conseil agricole et des agriculteurs.rice.s. Différentes disciplines doivent être mobilisées, agronomie, génétique et amélioration des plantes, zootechnie, écologie pour revoir les pratiques agricoles, les variétés, les systèmes de culture, les systèmes d'élevage et même les systèmes alimentaires. Le soutien des institutions nationales et européennes est indispensable pour accompagner cette transition à chacun de ces niveaux.

Article accepté pour publication le 13 septembre 2022

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFPF, (2017a). "Mélanges de semences pour prairies de courte et moyenne durée en France (moins de 3 ans)." *Association Française pour la Production Fourragère*, 1-8.
- AFPF, (2017b). "Mélanges de semences pour prairies de longue durée en France (3 ans en plus)." 1-6.
- Angevain M., Prosperi J.M., (1995). "Les sainfoins ou le genre *onobrychis*." *Ressources génétiques des plantes fourragères et à gazon*, J. M. Prosperi, P. Guy, and F. Balfourier, eds., BRG, INRA, Paris, 169-175.
- Annicchiarico P., Pecetti L., Abdelguerfi A., Bouzigaren A., Carroni A.M., Hayek T., Bouzina M.M., Mezni M., (2011). "Adaptation of landrace and variety germplasm and selection strategies for lucerne in the mediterranean basin." *Field Crops Res.*, 120(2), 283-291.
- Asal S., Geoffroy E., Dely S., Uthayakumar T., Gauffier A., (2017). "Vers une alimentation bas carbone, saine et abordable. Etude comparative multidimensionnelle de paniers : Impact carbone, qualité nutritionnelle et coûts." WWF; ECO2 Initiative, 48.
- Berthet E.T.A., Bretagnolle V., Segrestin B., (2014). "Surmonter un blocage de l'innovation par la conception collective. Cas de la réintroduction de luzerne dans une plaine céréalière." *Fourrages*, 217, 13-21.
- Berthet H., (1970). "Le lotier." *Fourrages*, 41, 144-145.
- Blondon F., Chesneaux M.T., Guy P., (1967). "Action de photopériodes et de thermopériodes sur le comportement de deux types extrêmes de luzernes française, *medicago sativa* L." *Compte-rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série D Sciences Naturelles*, 264, 596-598.
- Brisson N., Launay M., Maru B., Beaudoin N., (2008). Editions Quae, Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model.
- Cohan J.P., (2012). "Mieux valoriser l'azote de la luzerne dans la rotation." *Perspectives Agricoles* 395, 42-44.
- Cong W.F., Dupont Y.L., Soegaard K., Eriksen J., (2020). "Optimizing yield and flower resources for pollinators in intensively managed multi-species grasslands." *Agriculture Ecosystems & Environment*, 302, 10.
- Dierking R.M., Kallenbach R.L., Grun I.U., (2010). "Effect of forage species on fatty acid content and performance of pasture-finished steers." *Meat Science*, 85(4), 597-605.
- Duru M., Magrini M.B., (2017). "Consommer des produits dont les animaux ont été alimentés à l'herbe est-il suffisant pour équilibrer notre alimentation en acides gras poly-insaturés ?" *Fourrages*, 228, 301-312.
- Elboutahiri N., Thami-Alami I., Udupa S.M., (2010). "Phenotypic and genetic diversity in *sinorhizobium meliloti* and *s. medicae* from drought and salt affected regions of morocco." *BMC Microbiol.*, 10.
- Erice G., Louahia S., Irigoyen J.J., Sanchez-Diaz M., Alami I.T., Avice J.C., (2011). "Water use efficiency, transpiration and net CO₂ exchange of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery." *Environ. Exp. Bot.*, 72(2), 123-130.
- Faverjon L., Escobar-Gutiérrez A., Litrico I., Louarn G., (2017). "A conserved shoot developmental framework applies to legume species with contrasting morphogenetic strategies." *Front Plant Sciences*.
- Gale F., Valdes C., Ash M., (2019). "Interdependence of China, United States, and Brazil in soybean trade." *USDA, Economic Research Service*, 48.
- Gaudio N., Louarn G., Barillot R., Meunier C., Vezy R., Launay M., (2022). "Exploring complementarities between modelling approaches that enable upscaling from plant community functioning to ecosystem services as a way to support agroecological transition." *In Silico Plants*, 4(1).
- Guillemot E., Martinet Y., Brice C., Le Chatelier D., Julier B., Riedacker A., Migliore S., Larbre D., Robert P., Moons F.X., Billot C., Richardier C., Maignan S., Huvet S., Oliviero A., Julliard S., Lecompte P., Crocq G., Lett J.-M., Basigalup D., Lu X., Ai L., Zhang H., J. C., (2019). "Luzerne références. Edition 2019-2021." *C. d. F. Déshydratation*, ed. Paris, 118.
- Hélias R., (2019). "La couverture permanente et maîtrisée en ab !? Chiche !" *Journée technique "Grandes cultures bio"*, CDA24; CDA47, Rampieux (France).
- Julier B., (1996). "Traditional seed maintenance and origins of the French lucerne landraces." *Euphytica*, 92, 353-357.
- Julier B., Gastal F., Louarn G., Badenhauer I., Annicchiarico P., Crocq G., Le Chatelier D., Guillemot E., Emile J.C., (2017). "Alfalfa (lucerne) in European cropping systems." *Legume Futures*, S. F., W. C., and M.-B. D., eds., CABI, Wallingford, 168-192.
- Julier B., Roldán-Ruiz I., Lloyd D., Muylle H., Grumeza R., Torres A.M., Skot L., Kölliker R., (2021). "The application of genomic technologies in the breeding of legume species." C. Howarth, and S. Clarke, eds., Aberystwyth University, Aberystwyth 182.
- Labreuche J., (2017). "Impacts de couverts permanents sur le blé tendre d'hiver." *13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS*, COMIFER, Nantes.
- Leclercq D., Basset A., Bourdon P., Gras M.-C., Julier B., Leclerc C., Litrico I., (2017). "Catalogue français : Valorisation de la sélection pour les variétés de cultures intermédiaires multi-services." *Innovations Agronomiques*, 62, 101-114.
- Lemaire G., (2014). "L'intégration agriculture-élevage, un enjeu mondial pour concilier production agricole et environnement." *Innovations Agronomiques*, 39, 181-190.
- Lenoble M., (1964). "Le trèfle blanc." *Fourrages*, 20, 89-93.
- Lenoble M., Porcheron P., (1970). "Etudes d'espèces non utilisées couramment - diverses légumineuses." *Fourrages*, 41, 162-164.
- Louarn G., Barillot R., Combes D., Escobar-Gutiérrez A., (2020). "Towards intercrop ideotypes: Non-random trait assembly can promote overyielding and stability of species proportion in simulated legume-based mixtures." *Ann. Bot.*, 126(4), 671-685.
- Louarn G., Faverjon L., Bijelic Z., Julier B., (2016). "Dynamique de l'azote dans les associations graminées-légumineuses : Quels leviers pour valoriser l'azote fixé ?" *Fourrages*, 226, 135-142.
- Maamouri A., Louarn G., Beguier V., Julier B., (2017). "Performance of lucerne genotypes for biomass production and nitrogen content differs in monoculture and in mixture with grasses and is partly predicted from traits recorded on isolated plants." *Crop & Pasture Science*, 68(10-11), 942-951.
- Magrini M.B., Julier B., (2019). "Quelle place pour les légumineuses dans une Europe agroécologique ?" *Economie Rurale*, 370, 7.
- Mansat P., (1969). "Les potentiels de productions fourragères d'après des références acquises à l'échelle expérimentale." *Fourrages*, 38, 75-88.
- Meilhac J., Durand J.L., Béguier V., Litrico I., (2019). "Increasing the benefits of species diversity in multispecies temporary grasslands by increasing within-species diversity." *Ann. Bot.*, 123, 891-900.
- Meiss H., Mediene S., Waldhardt R., Caneill J., Bretagnolle V., Reboud X., Munier-Jolain N., (2010). "Perennial lucerne affects weed community trajectories in grain crop rotations." *Weed Res.*, 50(4), 331-340.
- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Farès M., Le Bail M., Magrini M.B., Savini I., (2013). "Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières." INRA, 1-52.
- Mueller-Harvey I., Bee G., Dohme-Meier F., Hoste H., Karonen M., Kölliker R., Luscher A., Niderkorn V., Pellikaan W.F., Salminen J.P., Skot L., Smith L.M.J., Thamsborg S.M., Totterdell P., Wilkinson I., Williams A.R., Azuhwi B.N., Baert N., Brinkhaus A.G., Copani G., Desrues O., Drake C., Engstrom M., Frygas C., Girard M., Huyen N.T., Kempf K., Malisch C., Mora-Ortiz M., Quijada J., Ramsay A., Ropiak H.M., Waghorn G.C., (2019). "Benefits of condensed tannins in forage legumes fed to ruminants: Importance of structure, concentration, and diet composition." *Crop Sci.*, 59(3), 861-885.
- Niderkorn V., Baumont R., (2009). "Associative effects between forages on feed intake and digestion in ruminants." *Animal*, 3(7), 951-960.
- Nyfelor D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E., Lüscher A., (2011). "Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources." *Agriculture Ecosystems & Environment*, 140, 155-163.
- Peyraud J.L., Aubin J., Barbier M., Baumont R., Berri C., Bidanel J.P., Citti C., Cotinot C., Ducrot C., Dupraz P., Faverdin P., Friggens N., Houot S., Nozieres-Petit M.O., Rogel-Gaillard C., Sante-Lhoutellier V., (2019). "Science for tomorrow's livestock farming: A forward thinking conducted at INRA." *Inra Productions Animales*, 32(2), 323-338.

- Pfimplin A., Gall A.L., Perrot C., Rouillé B., Saille M., Poux X., (2021). "L'élevage français et européen pourrait se passer du soja américain." *Séance du 31 mars 2021*, A. d. a. d. France, ed.Paris, 3.
- Pochon A., (2008). *Agronomes et paysans, un dialogue fructueux*, Quae, Versailles.
- Poux X., Aubert P.-M., (2018). "Une Europe agroécologique en 2050 : Une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. Enseignements d'une modélisation du système alimentaire européen". *Iddri-ASCA*, Paris, France.
- Protin P.V., Gastal F., Julier B., Pelletier P., Pierre P., Straëbler M., Surault F., (2014). "Les prairies multi-espèces, un levier pour des systèmes fourragers performants." *Fourrages*, 218, 167-176.
- Rivaroli D., Prunier A., Meteau K., do Prado I.N., Prache S., (2019). "Tannin-rich sainfoin pellet supplementation reduces fat volatile indoles content and delays digestive parasitism in lambs grazing alfalfa." *Animal*, 13(9), 1883-1890.
- Ruget F., Durand J.L., Ripoche D., Graux A.I., Bernard F., Lacroix B., Moreau J.C., (2013). "Impact of climate change on forage production (grassland, alfalfa, maize): Regional and seasonal variability." *Fourrages*, 214, 99-109.
- Rusch A., Bommarco R., Jonsson M., Smith H.G., Ekbom B., (2013). "Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale." *J. Appl. Ecol.*, 50(2), 345-354.
- Strullu L., Beaudoin N., Thiebeau P., Julier B., Mary B., Ruget F., Ripoche D., Rakotovololona L., Louarn G., (2020). "Simulation using the stics model of c&n dynamics in alfalfa from sowing to crop destruction." *European Journal of Agronomy*, 112.
- Thiébeau P., Badenhausser I., Meiss H., Bretagnolle V., Carrère P., Chagué J., Decourtye A., Maleplate T., Médiène S., Lecompte P., Plantureux S., Vertès F., (2010). "Contribution des légumineuses à la biodiversité des paysages ruraux." *Innovations Agronomiques*, 11, 187-204.
- Uddin M.E., Santana O.I., Weigel K.A., Wattiaux M.A., (2020). "Enteric methane, lactation performances, digestibility, and metabolism of nitrogen and energy of holsteins and jersey fed 2 levels of forage fiber from alfalfa silage or corn silage." *J. Dairy Sci.*, 103(7), 6087-6099.
- Vertès F., Jeuffroy M.H., Louarn G., Voisin A.S., Justes E., (2015). "Légumineuses et prairies temporaires : Des fournitures d'azote pour les rotations." *Fourrages*, 223, 221-232.
- Voltaire F., Ahmed L.Q., Barre P., Bourgoin T., Durand J.L., Escobar-Gutierrez A., Fakiri M., Ghesquiere M., Julier B., Kallida R., Louarn G., Morvan-Bertrand A., Picon-Cocharde C., Prud'homme M.P., Shaimi N., Zaka S., Zhouli L., Zwicke M., (2016). "Quelle est la variabilité intra- et interspécifique des caractères d'adaptation des espèces prairiales pérennes aux variables du changement climatique ?" *Fourrages*, 225, 1-9.
- Zaka S., (2016). "Caractérisation et modélisation des réponses à la température de la luzerne et de la fétuque élevée pour des variétés d'origines contrastées - application au modèle stics." *Thèse*, Université de Poitiers, Poitiers.