

# Sélection des légumineuses fourragères pour accroître leur rôle agroécologique

B. Julier<sup>1</sup>

**Des pratiques de sélection renouvelées permettent de valoriser la diversité des légumineuses fourragères, des espèces au cœur d'une agriculture agroécologique.**

## RESUME

La sélection est un levier pour créer des variétés toujours mieux adaptées à une agriculture agroécologique. Les variétés actuelles des principales espèces de légumineuses fourragères (luzerne, trèfle violet, trèfle blanc) sont les témoins d'efforts pour améliorer la production fourragère, sa qualité et la tolérance aux ravageurs et aux contraintes de culture. D'autres caractères doivent être travaillés, comme l'adaptation à la culture en mélange d'espèces et la tolérance au stress hydrique mais aussi la production de semences. Tout en exploitant la diversité génétique, de nouvelles méthodes de phénotypage et de sélection assistée par marqueurs peuvent accélérer le progrès génétique, d'autant que les acteurs publics et privés sont capables de travailler ensemble à la révision des schémas de sélection. Les espèces pérennes riches en tannins ou les espèces annuelles, actuellement d'importance mineure, peuvent contribuer à la diversification et devraient aussi bénéficier d'une amélioration génétique des caractères clés.

## SUMMARY

### **Selection of forage legumes to enhance their agroecological role**

Breeding is a lever to create always improved varieties, adapted to agroecology agriculture. Present varieties of major legume forage species (luzerne, red clover, white clover) are witnesses of efforts to improve forage production and quality, and tolerance to biotic and abiotic constraints. Other traits should be improved, such as adaptation to mixed cropping with grasses and drought tolerance but also seed production. While exploiting genetic diversity, new phenotyping and breeding methods may increase the genetic progress. Public and private actors are able to work together to revise breeding schemes. Tannin-rich perennial species or annual species, presently of minor importance, are useful for diversification and should also benefit from genetic progress for key traits.

Depuis les années 1970 et l'établissement d'un catalogue de variétés fourragères, la sélection des légumineuses fourragères est un domaine actif en France et ailleurs en Europe et dans le monde. Dans le regain d'intérêt qu'elles suscitent (Julier et Louarn, 2022), la sélection est un levier permettant d'accroître le rendement, la qualité et les composantes de leur adaptation aux milieux, aux pratiques de culture et aux usages pour maximiser les services qu'elles procurent (Rubiales et al., 2021).

Cet article décrit les espèces sélectionnées et les critères les plus utilisés puis aborde les nouveaux critères qui devraient être intégrés pour une plus grande utilisation des légumineuses dans une agriculture agroécologique. Les acquis récents sur la diversité génétique, le phénotypage et la sélection assistée par marqueurs sont décrits pour montrer que le progrès

génétique pourrait être accéléré dans les années qui viennent. Enfin, les forces en présence et les atouts de collaborations intensives entre recherche publique et privée sont abordés.

## Quelles espèces et quels critères ?

L'activité de création variétale est concentrée sur les trois espèces de légumineuses fourragères pérennes principalement utilisées : la luzerne, le trèfle violet et le trèfle blanc (Tableau 1). Ces trois espèces couvrent assez bien les différentes conditions pédoclimatiques et d'utilisation rencontrées en France pour la production fourragère : fauche pour la luzerne et le trèfle violet, pâturage pour le trèfle blanc ; sols acides pour le trèfle blanc, tolérance à la sécheresse pour la luzerne. Le flux variétal sur le sainfoin, le lotier, qualifiées « d'espèces

### AUTEURS

1 : INRAE, P3F, F-86600 Lusignan France, bernadette.julier@inrae.fr

MOTS-CLES : fabacée, protéine, azote, variété, sélection, diversité génétique, génotypage, phénotypage

KEY-WORDS: fabacea, protein, nitrogen, breeding, genetic diversity, genotyping, phenotyping

REFERENCE DE L'ARTICLE : B. Julier (2023). « Sélection des légumineuses fourragères pour accroître leur rôle agroécologique », *Fourrages* 255, 33-39

mineures », est extrêmement faible, même si le sainfoin est apprécié pour sa tolérance à la sécheresse et son appétence pour les animaux liée à une forte teneur en sucres solubles. Les tannins condensés présents chez le lotier et le sainfoin réduisent la dégradation des protéines de la ration dans le rumen, ce qui améliore la valorisation de l'azote, limite la météorisation et les émissions de méthane ; ils permettent aussi de lutter contre les parasites intestinaux (Mueller-Harvey et al., 2019). D'ailleurs, les ventes de semences de sainfoin sont loin d'être négligeables (Tableau 1). Pour d'autres espèces pérennes, il n'y a plus une seule variété inscrite en Europe (mélilot blanc, mélilot jaune, coronille). Parmi les nombreuses légumineuses fourragères annuelles à petites graines (27 espèces mentionnées dans le catalogue européen), plusieurs espèces (trèfle incarnat, d'Alexandrie, de Perse, etc.) connaissent un regain d'intérêt pour un usage de plantes fourragères cultivées en dérobé ou de plantes de services en interculture. Le flux variétal reste très faible en France, suggérant une activité de sélection restreinte. Dans un usage de service, ces espèces contribuent à l'autonomie protéique par le biais de leur fixation symbiotique de l'azote mis à disposition des cultures suivantes dans la rotation ou des cultures de rente semées dans un couvert de légumineuses.

Les surfaces de production de semences sont souvent le reflet de l'activité de création variétale. La situation française des légumineuses est assez contrastée : la France produit et exporte largement des semences de luzerne, de trèfle violet et de trèfle incarnat (Tableau 1), produit une partie des semences de sainfoin et de trèfle incarnat, et importe la quasi-totalité des semences de trèfle blanc et des autres espèces. Dans cette situation, les activités de sélection sur le trèfle blanc sont minimales en France, les variétés inscrites

ont été obtenues dans différents pays d'Europe du Nord (Grande-Bretagne, Irlande, Danemark...).

Les cibles de sélection sont déterminées après le recueil des besoins des agriculteurs et éleveurs, et leur interprétation par les sélectionneurs en fonction de leurs objectifs de marché. Au fil des années, le CTPS, chargé de l'inscription des variétés, fait évoluer les critères d'évaluation pour prendre en compte le contexte agricole, par exemple en incluant des résistances à des maladies ou des critères de qualité fourragère liés à la teneur en protéines et à la digestibilité. La sélection des légumineuses fourragères aborde depuis toujours le rendement fourrager et les composantes déterminant son adaptation aux pratiques de culture (rythme de coupe et tolérance à la verse de la luzerne, survie en compétition avec des graminées du trèfle blanc), mesurés dans des essais de trois ans pour les pérennes, deux ans pour les annuelles. Différentes classes de variétés décrivant des types d'adaptation sont disponibles, liées à la dormance automnale pour la luzerne (survie au froid hivernal) et la taille des folioles pour le trèfle blanc (agressivité face aux graminées fourragères), la ploïdie du trèfle violet. La pérennité est prise en compte par le rendement en troisième année ou l'estimation de la densité du couvert. Occasionnellement, des variétés de luzerne et de trèfle violet tolérantes au pâturage ont été obtenues (Luzelle et Coussouls pour la luzerne, Pastor pour le trèfle violet). La tolérance aux principaux ravageurs en végétation est aussi travaillée (verticilliose, anthracnose et nématode de la luzerne, sclérotiniose et oïdium du trèfle violet), dans une situation qu'on peut qualifier de favorable puisque l'évolution des races de pathogènes est lente. Un critère de qualité (la teneur en protéines) a été intégré dès les années 1980 pour la luzerne, alors qu'il a fallu attendre 2003 pour que la digestibilité soit additionnée

Espèces	Nombre de variétés sur le catalogue français en 2022 <sup>1</sup>	Nombre de variétés sur le catalogue européen en 2022 <sup>1</sup>	Surfaces de multiplications de semences en France en 2022 (ha) <sup>2</sup>	Ventes de semences en France en 2020/21 (qx) <sup>2</sup>
<b>Espèces pérennes</b>				
Luzerne	80	431	19 271	39 571
Trèfle violet	33	244	5 566	22 974
Trèfle blanc	31	122	50	9 428
Sainfoin	1	21	394	7 689
Lotier	1	34	126	1 506
<b>Espèces annuelles</b>				
Trèfle incarnat	6	49	2 857	20 859
Trèfle d'Alexandrie	5	50	537	18 229
Trèfle de Perse	0	26	53	1 409
Trèfle hybride	1	15	5	1 249
Minette	0	3	20	

1 [https://ec.europa.eu/food/plant/plant\\_propagation\\_material/plant\\_variety\\_catalogues\\_databases/search/](https://ec.europa.eu/food/plant/plant_propagation_material/plant_variety_catalogues_databases/search/)

2 <https://www.semae.fr/etudes-donnees-statistiques-semences/>

**TABLEAU 1 : Nombre de variétés de légumineuses fourragères inscrites sur le catalogue officiel français et européen ; surfaces de multiplications de semences et ventes de semences**

**Table 1 : Number of forage legume varieties listed on the French and the European official catalogue**

aux critères d'inscription et de sélection. Pour le trèfle violet, la prise en compte de la qualité (teneur en protéines et digestibilité) sera effective à partir des inscriptions 2027. Concernant le trèfle blanc dont la récolte est composée presque uniquement de feuilles, les experts estiment que la biomasse récoltée est toujours de bonne valeur alimentaire. Aucun critère de qualité n'est mesuré sur les espèces mineures ni sur les espèces annuelles.

Pour les légumineuses annuelles utilisées comme plantes de couverture semées en été et détruites au cours de l'hiver, les caractéristiques de qualité de l'implantation (vitesse de levée et couverture du sol) sont notées. La biomasse produite et sa teneur en azote quantifient la quantité d'azote immobilisé qu'il provienne de l'absorption de l'azote résiduel du sol ou de la fixation d'azote atmosphérique. Cette biomasse, riche en carbone et en azote, viendra enrichir les sols. Pour optimiser le devenir de cette biomasse, un rapport C/N inférieur à 15 est recherché (Leclercq et al., 2021). Pour le moment, aucune variété de légumineuse n'est inscrite pour un usage de plante compagne non récoltée au service d'une culture de rente (blé, colza, etc.).

## **De nouveaux critères de sélection**

Le nouveau plan « Semences et plants pour une agriculture durable » (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021) met en avant l'intérêt des mélanges d'espèces pour maximiser l'azote fixé par les légumineuses et réduire l'impact des adventices, en limitant au maximum l'utilisation d'intrants chimiques. Si les recommandations de mélanges d'espèces se stabilisent progressivement (AFPF, 2017a, AFPF, 2017b), le choix variétal est plus complexe, d'autant que les variétés sont inscrites après des évaluations en culture pure (sauf le trèfle blanc). L'intérêt des mélanges d'espèces et de variétés, lié à la valorisation des ressources (lumière, azote, eau...) est conditionné à la maîtrise des proportions de graminées et de légumineuses (Louarn et al., 2010).

Au-delà d'un accès à l'azote qui relève surtout d'un partage de niche entre graminées et légumineuses (Louarn et al., 2016), les différences génétiques pour la compétition entre plantes sont fortement liées à l'interception de la lumière (Maamouri et al., 2015). Si le choix variétal a un impact sur les performances (rendement, qualité, proportion des espèces) d'un mélange composé d'une graminée et d'une légumineuse (effet additif), l'interaction statistique entre la variété de graminée et la variété de légumineuse n'a pas été démontrée (Annicchiarico et Proietti, Julier et al., 2014, Maamouri et al., 2015). De façon non contradictoire, l'augmentation de la diversité génétique des espèces incluses dans un mélange semble avoir l'intérêt majeur de stabiliser la production sans spécialement l'accroître (Meilhac et al., 2019). Les conséquences de ces résultats pour la création variétale de légumineuses fourragères ne sont pas complètement établies. Des variétés de trèfle

blanc avec des feuilles géantes ont été créées pour maximiser la proportion de légumineuses en mélange (Annicchiarico et Proietti, 2010). Sur la luzerne, des variétés moins hautes, à port moins érigé que les variétés fourragères pourraient permettre de mieux conserver l'équilibre luzerne/graminées (Maamouri et al., 2017). Beaucoup reste à faire pour définir et créer des idéotypes pour l'utilisation en mélange d'espèces (Annicchiarico et al., 2019) et à les mettre à l'épreuve. De même, le choix des variétés à combiner dans des mélanges d'espèces demande à disposer de clés de décision.

La production de semences est une composante essentielle de la durabilité économique des filières semencières. Pourtant, la sélection pour la production de semences est relativement négligée dans la mesure où sa prise en compte dans les schémas de sélection, en plus des critères liés au fourrage, les alourdit très sensiblement. Finalement, alors qu'il existe de la variabilité génétique pour les composantes de la production de semences et que leur héritabilité est forte (Bolaños-Aguilar et al., 2001), les sélectionneurs ne font guère plus que vérifier que leurs nouvelles variétés ont une production de semences au moins égale à celle des précédentes variétés. Un effort sur ces caractères devrait permettre de créer un réel progrès génétique.

Toujours dans le domaine de la production de semences, les interdictions successives de plusieurs insecticides révèlent les ravages occasionnés par six à huit insectes ravageurs des graines ou des gousses de légumineuses. Alors que ces insectes sont bien décrits (Bouet et al., 2021), leur nuisibilité est mal connue. Au-delà de pratiques agronomiques permettant probablement de réduire leur impact, l'amélioration génétique sera certainement un levier important. Pour cela, il faudra tester l'existence de sources de résistance, après la mise au point de tests en conditions contrôlés, eux-mêmes nécessitant de mieux connaître la biologie des insectes et leurs conditions d'élevage.

Dans le contexte du changement climatique, après avoir choisi les légumineuses les plus tolérantes à la sécheresse (lotier, sainfoin, luzerne), l'amélioration de leur tolérance consistera à maximiser les capacités d'exploitation des réserves du sol par les racines (Annicchiarico, 2007) et à limiter les pertes d'eau (Erice et al., 2011).

La valeur alimentaire (teneur en protéines et digestibilité) des légumineuses autres que la luzerne et le trèfle violet pourrait utilement être mesurée, en particulier pour le lotier et le sainfoin. Pour plusieurs espèces, d'autres composés pourraient être sélectionnés car ils procurent des avantages réels : teneur en sucres solubles (Claessens et al., 2021), teneur en tannins condensés du lotier, du sainfoin et de la coronille (Julier et al., 2003), teneur en saponines de la luzerne pour réduire les émissions de méthane (Kozłowska et al., 2020), etc.

Enfin, pour utiliser des légumineuses fourragères pérennes comme culture de couvert pérenne, ou mulch vivant, dans lesquelles des céréales d'hiver sont semées (Cougnon et al., 2022), un important travail d'idéotypage est nécessaire pour définir le type variétal optimal. L'exploitation de ressources génétiques non utilisées dans la création variétale des types fourragers sera certainement indispensable (voir Julier et al, poster Journées Printemps 2023).

Avec la compréhension des mécanismes de fourniture des services écosystémiques de régulation (accueil de pollinisateurs, stockage de carbone dans les sols, etc.), et sous réserve qu'une diversité génétique soit disponible, de nouveaux caractères liés à ces services pourront être inclus dans les critères de sélection.

## Renouvellement des approches de sélection

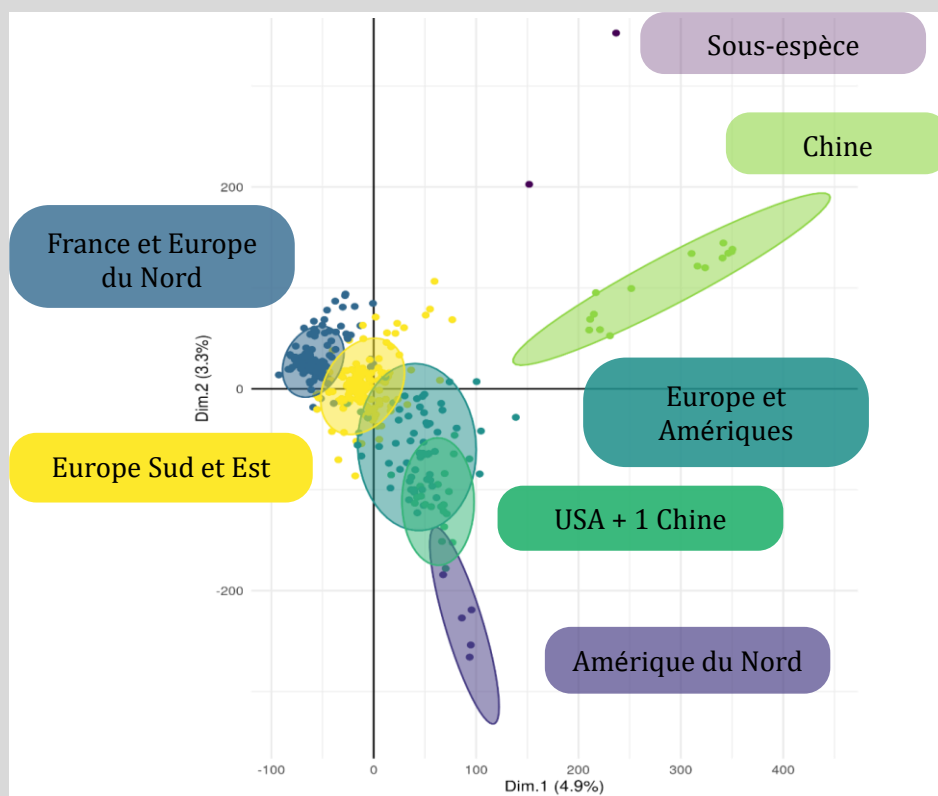
La sélection récurrente, basée sur des observations phénotypiques réalisées sur des plantes individuelles ou des familles, au champ ou en conditions contrôlées, reste la principale méthode. Les sélectionneurs se concentrent sur leur base génétique historique, en y

incorporant prudemment de la diversité génétique sans prendre de risque de s'éloigner de leur idéotype.

Pourtant, trois pistes de progrès sont à considérer : l'extension de la diversité génétique utilisée en sélection, l'utilisation de méthodes de phénotypage basées sur de l'imagerie et la mise en œuvre de sélection assistée par des marqueurs moléculaires.

## Extension de la diversité génétique

Il est bien connu, pour les légumineuses fourragères comme pour les autres espèces, que la diversité utilisée en sélection n'est qu'une portion de la diversité génétique disponible. Bien logiquement, la création de variétés destinées à un usage précis conduit à ignorer les populations qui ne portent pas les caractères favorables. Cependant, les marqueurs moléculaires permettent de revoir en profondeur les connaissances sur la diversité génétique. Il a ainsi été montré que les variétés européennes de luzerne n'utilisent qu'une portion de la diversité sélectionnée (figure 1), omettant largement les fonds génétiques développés en Amérique du Nord et du Sud, et plus encore de Chine (Pégard et al., 2021a). La diversité génétique disponible pour le trèfle violet est également importante (Kölliker, 2022).



**FIGURE 1 : Structuration de la diversité génétique dans un ensemble de 395 variétés mondiales de luzerne, étudiées à l'aide de 89 216 marqueurs moléculaires GBS, représentées sur les deux premiers axes d'une ACP. Les groupes colorés ont été obtenus par une analyse DAPC. Les cartouches indiquent les origines des variétés que contiennent ces groupes, il s'avère que la géographie des origines est cohérente avec les groupes.**

*Figure 1 : Genetic structure in a set of 395 lucerne varieties, studied with 89 216 GBS molecular markers, on the first two axes of a PCA. The coloured groups have been obtained with a DAPC analysis. The cartridges indicate the origins of the varieties contained in these groups, and it appears that the geography of the origins is consistent with the groups.*

## **L'analyse d'images pour parfaire le phénotypage**

La capture d'images sur des dispositifs expérimentaux peut-être réalisée grâce à des caméras embarquées sur des drones qui survolent les parcelles ou sur des véhicules qui les parcourent (Surault et al., 2021b). Pour les légumineuses fourragères, après traitement de données, les images permettent de reconstituer la hauteur des plantes et la biomasse produite avec une précision similaire à celle d'un essai (Cazenave et al., 2019, Surault et al., 2021a, Tang et al., 2021). Elles peuvent aussi permettre d'évaluer la couverture du sol ou l'effet de stress biotiques ou abiotiques. Dans leur essence, ces données ne sont pas différentes de celles acquises par des notations ou des récoltes mais, non destructrices, elles permettent de recueillir ces données de façon dynamique au cours de la croissance. Ainsi, la dynamique de croissance en hauteur ou en biomasse peut être établie. De nouvelles organisations du travail peuvent être conçues : plus de parcelles peuvent être mesurées, avec des données plus fines, permettant d'accroître le nombre de génotypes ou populations en étude. Même si les parcelles doivent être fauchées, et, sur certaines coupes, des échantillons prélevés pour des analyses de composition biochimiques, les travaux de récolte peuvent être sensiblement réduits ainsi que leur pénibilité.

## **Sélection assistée par marqueurs**

Par des approches de génétique d'association dans lesquels on recherche une corrélation entre la diversité pour des marqueurs et la diversité phénotypique, des marqueurs associés à des caractères peuvent être identifiés (Frey et al., 2022, Pégard et al., 2021b). Une approche basée sur des gènes candidats, connus pour être impliqués dans des caractères agronomiques, permet aussi d'identifier des variants alléliques dont l'effet sur le phénotype peut être fort (Gréard et al., 2018). Sur la base de marqueurs à effets majeurs expliquant 10 à 15% de la variabilité phénotypique, une sélection des plantes les plus prometteuses peut ainsi être utilement réalisée.

La disponibilité en marqueurs permet aussi de tester l'intérêt de la sélection génomique, qui vise à identifier les individus dont on prédit une valeur génétique favorable. A partir de populations de luzerne génotypées et phénotypées, des équations de prédiction permettant une valeur prédictive supérieure à 50% ont été obtenues pour le rendement fourrager, la teneur en protéines et la teneur en fibres (liée à la digestibilité) (Julier et al., 2022). Des travaux similaires sont en cours sur le trèfle violet (Kölliker, 2022). Elles pourront permettre de choisir les individus prometteurs, avant même de les mettre en croisement (Julier et al., 2022).

La sélection assistée par marqueurs en est à ses balbutiements sur la luzerne et le trèfle violet, elle

nécessite encore de faire des preuves de démonstration dans des programmes de sélection en grandeur réelle.

## **La sélection des espèces mineures ?**

Espèces mineures, espèces de niche, elles sont à la fois délaissées et recherchées. Prenant exemple sur d'autres filières (plantes à parfum, médicinales, aromatiques, ornementales) pour lesquels les surfaces sont parfois faibles, ne pourrait-on pas identifier les caractères présentant un verrou actuel au développement des cultures ? La production de semences l'est clairement pour le sainfoin, telle qu'identifiée dès les années 1960-70 (Chesneaux et Demarly, 1970). Une sélection « éclair » pour un petit nombre de caractères pourrait permettre de déverrouiller la situation et peut-être de créer les conditions d'un retour en grâce de ces espèces, tant auprès des sélectionneurs, des semenciers que des utilisateurs.

Les sophistications des outils de sélection, pour le phénotypage ou la sélection assistée par marqueurs, sont applicables pour tous les caractères, y compris potentiellement pour ceux liés à des services environnementaux, et toutes les espèces, pourvu que des moyens soient disponibles. Le transfert de connaissances entre espèces permet une certaine économie dans la mise au point des méthodes sans dispenser d'une étape de validation.

## **Panorama des forces en présence**

Que ce soit dans la recherche publique ou privée, les efforts consentis en génétique sur les légumineuses fourragères ne sont proportionnels ni à leurs surfaces ni à leur intérêt agroécologique. La recherche publique est néanmoins active en France et dans la plupart des pays européens, en général sur l'espèce principalement utilisée (luzerne en France, en Italie et en Serbie, trèfle violet en Belgique et en Suisse, trèfle blanc en Grande-Bretagne...). Les principaux caractères sont étudiés en fonction de leurs priorités, tels que le rendement y compris en association, la qualité, la production de semences. Des efforts très notables ont été consentis pour développer des outils de génotypage à haut-débit, en optant pour la technologie de génotypage par séquençage (GBS), et en acquérant des données de séquences des génomes de la luzerne (Chen et al., 2020) et du trèfle violet (Yan et al., 2022). Avec ces nouveaux outils de marquage, les recherches sur les ressources génétiques et les déterminants génétiques des caractères progressent très significativement. Plusieurs des instituts publics de recherche sont aussi des sélectionneurs qui peuvent s'autoriser de tester une sélection avec des outils récemment mis au point dans les laboratoires pour le génotypage ou le phénotypage.

La recherche privée, réalisée dans des entreprises de sélection, conduit au dépôt à l'inscription de nombreuses variétés annuellement, avec une tendance

à la hausse (D. Leclercq, GEVES, communication personnelle). Le progrès génétique, répertorié sur le site Herbe-book (<https://www.herbe-book.org/>), démontre par exemple une hausse du rendement fourrager sans détérioration de la teneur en protéines pour la luzerne (figure 2) alors que les deux caractères sont corrélés négativement.

Les collaborations entre recherche publique et recherche privée sont actives depuis la création de l'ACVF (Association des Créateurs de Variétés Françaises) en 1970. Au cours des deux dernières décennies, ce sont surtout des projets sur la luzerne qui ont été conduits en France, même si un projet sur la valeur alimentaire du trèfle violet vient de s'achever. Soutenus par le Ministère en charge de l'agriculture, ces projets sont d'excellentes opportunités pour ancrer la recherche dans les besoins de la filière semence des légumineuses et de tester des pistes de progrès. Récemment, le projet européen EUCLEG, entre 2017 et 2021, a permis une production de connaissances et de données de génotypage et de phénotypage sans précédent, sur la luzerne (travaux coordonnés par l'INRAE en France) et le trèfle violet (travaux coordonnés par Agroscope en Suisse), dans un partenariat entre recherche publique et recherche privée. Des méthodes statistiques ont été développées et des formations ont été réalisées et restent disponibles en ligne (<http://www.eucleg.eu/index.php/outputs/training-material>) (Howarth et Clark, 2022). Ces résultats doivent maintenant être testés et éprouvés dans des programmes de sélection expérimentaux, dans lesquels la sélection assistée par marqueurs va pouvoir être mise en œuvre et son efficacité sera mesurée avec le matériel génétique des sélectionneurs. La rentabilité économique pourra ainsi être mesurée et comparée à celle d'une sélection phénotypique.

Enfin, la sélection des espèces mineures pourrait être menée par des organismes publics pour autant que des budgets soient disponibles et que les variétés ainsi créées soient multipliées et distribuées.

## Conclusion

Dans le contexte actuel où les surfaces contenant des légumineuses fourragères pérennes doivent s'accroître pour remplir différents services liés à leurs fonctions de production, d'apport d'azote réactif et de diversification des espèces et des variétés dans les systèmes de culture, la sélection peut apporter sa pierre à l'édifice, en plus des autres leviers disponibles. De nouvelles contraintes (stress hydrique, mélanges d'espèces) ou de nouveaux usages (plantes de service) conduisent à allonger les espèces d'intérêt et à compléter la liste des critères de sélection. Les méthodes de sélection utilisant le phénotypage haut-débit basé sur l'analyse d'images et l'assistance des marqueurs moléculaires devraient permettre d'accélérer le progrès génétique. Les acteurs de la sélection sont capables de mettre en œuvre des méthodes de sélection en exploitant la diversité génétique pour créer des variétés nécessaires aux agriculteurs.

Accepté pour publication le 1<sup>er</sup> mars 2023

## 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.

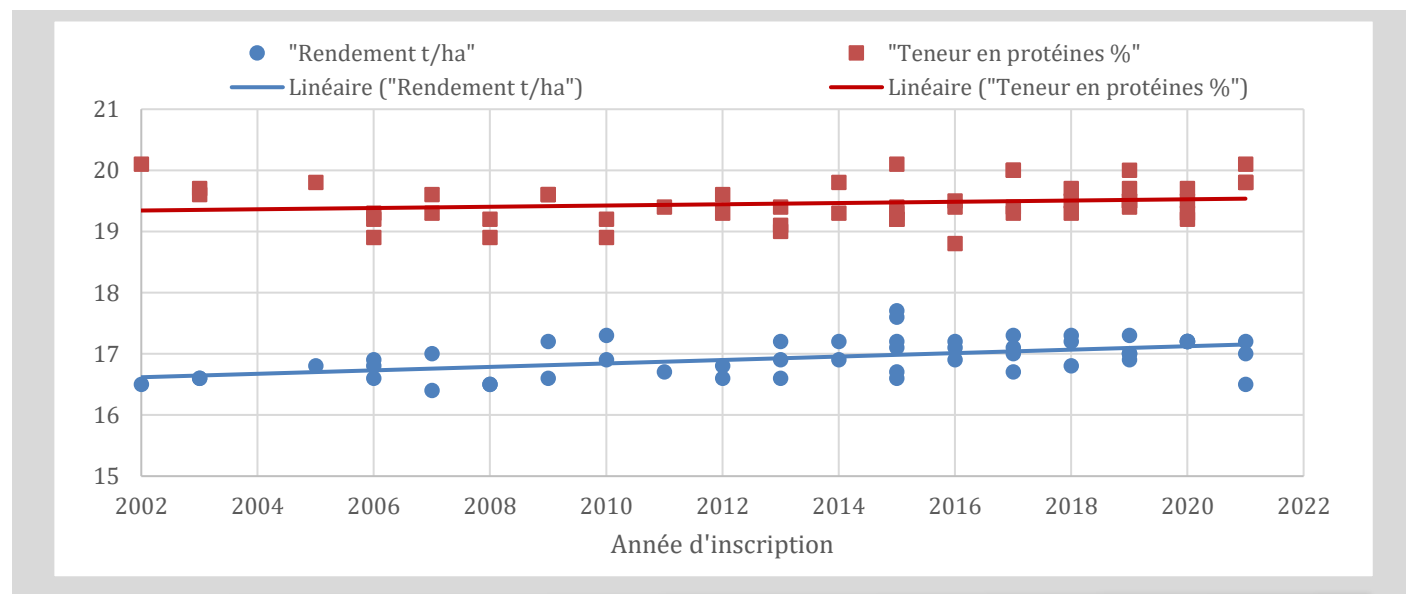


FIGURE 2 : Evolution du progrès génétique de la luzerne pour le rendement fourrager et la teneur en protéines. D'après les données publiées sur [www.herbe-book.fr](http://www.herbe-book.fr), extraites le 12 octobre 2022.

Figure 2 : Evolution of lucerne genetic progress for forage yield and protein content. From data available at [www.herbe-book.fr](http://www.herbe-book.fr), extracted on the 12<sup>th</sup> of November 2022.

- ANNICCHIARICO P. (2007). "Lucerne shoot and root traits associated with adaptation to favourable or drought-stress environments and to contrasting soil types." *Field Crops Res.*, 102(1), 51-59.
- ANNICCHIARICO P., COLLINS R.P., DE RON A.M., FIRMAT C., LITRICO I., HAUGGAARD-NIELSEN H. (2019). "Do we need specific breeding for legume-based mixtures?" *Advances in Agronomy*.
- ANNICCHIARICO P., PROIETTI S. (2010). "White clover selected for enhanced competitive ability widens the compatibility with grasses and favours the optimization of legume content and forage yield in mown clover-grass mixtures." *Grass Forage Sci.*, 65(3), 318-324.
- BOLAÑOS-AGUILAR E.D., HUYGHE C., DJUKIC D., JULIER B., ECALLE C. (2001). "Genetic control of alfalfa seed yield and its components." *Plant Breeding*, 120, 67-72.
- BOUET S., DENEUFBOURG F., AUGAGNEUR M. (2021). *Lucerne porte-graine*, FNAMS, Paris.
- CAZENAVE A.B., SHAH K., TRAMMELL T., KOMP M., HOFFMAN J., MOTES C.M., MONTEROS M.J. (2019). "High-throughput approaches for phenotyping alfalfa germplasm under abiotic stress in the field." *The Plant Phenome Journal*, 2, 190005.
- CHEN H.T., ZENG Y., YANG Y.Z., HUANG L.L., TANG B.L., ZHANG H., HAO F., LI W., LI Y.H., LIU Y.B., ZHANG X.S., ZHANG R., ZHANG Y.S., LI Y.X., WANG K., HE H., WANG Z.K., FAN G.Y., YANG H., BAO A.K., SHANG Z.H., CHEN J.H., WANG W., QIU Q. (2020). "Allele-aware chromosome-level genome assembly and efficient transgene-free genome editing for the autotetraploid cultivated alfalfa." *Nature Communications*, 11(1).
- CHESNEAU M.T., DEMARLY Y. (1970). "Le sainfoin." *Fourrages*, 41, 143-144.
- CLAESSENS A., BIFFUBUSA M., CHOUINARD-MICHAUD C., BERTRAND A., TREMBLAY G.F., CASTONGUAY Y., BELANGER G., BERTHIAUME R., ALLARD G. (2021). "Genetic selection for nonstructural carbohydrates and its impact on other nutritive attributes of alfalfa (*medicago sativa*) forage." *Plant Breeding*, 140(5), 933-943.
- COUGNON M., DURAND J.L., JULIER B., BARRE P., LITRICO I. (2022). "Using perennial plant varieties for use as living mulch for winter cereals. A review." *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 110.
- ERICE G., LOUAHLIA 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.
- FREY L.A., VLEUGELS T., RUTTIK T., SCHUBIGER F.X., PEGARD M., SKOT L., GRIEDER C., STUDER B., ROLDAN-RUIZ I., KOLLIKER R. (2022). "Phenotypic variation and quantitative trait loci for resistance to southern anthracnose and clover rot in red clover." *Theor. Appl. Genet.*
- GRÉARD C., BARRE P., FLAJOULOT S., SANTONI S., JULIER B. (2018). "Sequence diversity of five *medicago sativa* genes involved in agronomic traits to set up allele mining in breeding." *Mol. Breed.*, 38(12).
- HOWARTH, CLARK S. (2022). *The application of genomic technologies in the breeding of legume species*, Aberystwyth University, Aberystwyth.
- JULIER B., HUYGHE C., EMILE J.C. (2003). "Variations pour la dégradation des protéines de quatre espèces de légumineuses fourragères." *Fourrages*, 175, 367-371.
- JULIER B., LOUARN G. (2022). "Rôle des légumineuses pérennes dans une agriculture agroécologique." *Fourrages*, 251, 17-25.
- JULIER B., LOUARN G., GASTAL F., SURAULT F., SAMPOUX J.P., MAAMOURI A., FERNANDEZ L. (2014). "Les associations graminées - légumineuses prairiales. Comment sélectionner des variétés adaptées pour accroître leur productivité et faciliter leur conduite ?" *Innovations agronomiques*, 40, 61-72.
- JULIER B., PEGARD M., LEUENBERGER J., BARRE P. (2022). "Genomics assisted breeding in alfalfa." *The application of genomic technologies in the breeding of legume species*, C. Howarth, and S. Clark, eds., Aberystwyth University, Aberystwyth, 135-159.
- KÖLLIKER R. (2022). "Genomics assisted breeding in red clover." *The application of genomic technologies in the breeding of legume species*, C. Howarth, and S. Clark, eds., Aberystwyth University, Aberystwyth, 160-182.
- KOZŁOWSKA M., CIESLAK A., JOZWIK A., EL-SHERBINY M., STOCHMAL A., OLESZEK W., KOWALCZYK M., FILIPIAK W., SZUMACHER-STRABEL M. (2020). "The effect of total and individual alfalfa saponins on rumen methane production." *J. Sci. Food Agric.*, 100(5), 1922-1930.
- LECLERCQ D., BAGOT P., BOURDON P., CRIGNON R., DÜRR C., DUTHEIL J., DUVAL R., GENSOLLEN V., GRIMAULT V., HELLOU G., HÉNO S., HOUDAULT S., JULIER B., JUSTES E., LABREUCHE J., MINETTE S., PERROT S., RAVENEAU M.-P., TRIBOUILLOIS H., TROTTIN Y., WAGNER M.-H., WALCZAK P. (2021). "Evaluation des variétés nouvelles pour un usage en interculture: Identification et choix des indicateurs, des méthodes transférables et des outils expérimentaux adaptés aux cultures intermédiaires." *Innovations Agronomiques*, 84, 203-216.
- LOUARN G., CORRE-HELLOU G., FUSTEC J., LO-PELZER E., JULIER B., LITRICO I., HINSINGER P., LECOMTE C. (2010). "Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées-légumineuses." *Innovations Agronomiques*, 11, 79-99.
- 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.
- MAAMOURI A., LOUARN G., GASTAL F., BEGUIER V., JULIER B. (2015). "Effects of lucerne genotype on morphology, biomass production and nitrogen content of lucerne and tall fescue in mixed pastures." *Crop & Pasture Science*, 66(2), 192-204.
- MEILHAC J., DURAND J.L., BEGUIER V., LITRICO I. (2019). "Increasing the benefits of species diversity in multispecies temporary grasslands by increasing within-species diversity." *Ann. Bot.*, 123, 891-900.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION (2021). "Plan semences et plants pour une agriculture durable 2." Paris, 41.
- MUELLER-HARVEY I., BEE G., DOHME-MEIER F., HOSTE H., KARONEN M., KOLLIKER R., LUSCHER A., NIDERKORN V., PELLIKAN W.F., SALMINEN J.P., SKOT L., SMITH L.M.J., THAMSBORG S.M., TOTTERDELL P., WILKINSON I., WILLIAMS A.R., AZUHNWI B.N., BAERT N., BRINKHAUS A.G., COPANI G., DESRUES O., DRAKE C., ENGSTROM M., FRYGANAS 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.
- PÉGARD M., BARRE P., JULIER B. (2021). "New insights on the genetic structure of lucerne with gbs markers." *Proc., 34th Meeting of the Eucarpia Fodder Crops and Amenity Grasses Section*, Palacky University Olomouc, Freising, 17-20.
- PEGARD M., LEUENBERGER J., JULIER B., BARRE P. (2021). "Genomic prediction of lucerne forage yield and quality." *Proc., 34th Meeting of the Eucarpia Fodder Crops and Amenity Grasses Section*, Palacky University Olomouc, Freising, 105-108.
- RUBIALES D., ANNICCHIARICO P., PATTO M.C.V., JULIER B. (2021). "Legume breeding for the agroecological transition of global agri-food systems: A european perspective." *Frontiers in Plant Science*, 12.
- SURAULT F., ROY E., MAHIEU S., COMBES D., GHESQUIÈRE M., JULIER B. (2021a). "Uav to measure canopy height and plot biomass in a lucerne variety trial." 21. *Symposium of the European Grassland Federationonline*.
- SURAULT F., ROY E., MAHIEU S., COMBES D., LOUARN G., FRAK E., GHESQUIÈRE M., JULIER B. (2021b). "Mesurer la hauteur d'espèces fourragères pérennes par photogrammétrie à partir d'images acquises avec un drone." *Fourrages*(247), 105-108.
- TANG Z., PARAJULI A., CHEN C.J., HU Y., REVOLINSKI S., MEDINA C.A., LIN S., ZHANG Z.W., YU L.X. (2021). "Validation of uav-based alfalfa biomass predictability using photogrammetry with fully automatic plot segmentation." *Scientific Reports*, 11(1).
- YAN Z.F., SANG L.J., MA Y., HE Y., SUN J., MA L.C., LI S., MIAO F.H., ZHANG Z.X., HUANG J.W., WANG Z.Y., YANG G.F. (2022). "A de novo assembled high-quality chromosome-scale trifolium pratense genome and fine-scale phylogenetic analysis." *BMC Plant Biol.*, 22(1).