

La revue francophone sur les prairies et les fourrages

The French Journal on Grasslands and Forages

Les articles publiés dans Fourrages sont répertoriés dans : Agris, Resagri, Herbage Abstracts, Rural Development Abstracts, Web of Science, World Agricultural Economics and Rural Sociology Abstracts ainsi que par ISI.

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, pour vous
abonner ou pour
soumettre un article
dans la revue :

<https://afpf-asso.fr/informations-sur-la-revue-fourrages>

ISSN papier 0429-2766

ISSN numérique 2402-7294

N° Commission paritaire : 1127 G 82356+

Notre association a pour objectif, depuis 1959 de mieux diffuser les résultats de la recherche autour des fourrages et des prairies. Pour soutenir notre action et adhérer, consultez notre site internet.

VERS DES VARIÉTÉS DE LUZERNE UTILISÉES EN TANT QUE MULCH VIVANT POUR DES CULTURES DE CÉRÉALES DANS DES SYSTÈMES AGROÉCOLOGIQUES

Mise en situation

La luzerne, légumineuse pérenne reconnue pour sa fixation de l'azote, sa persistance et sa capacité à couvrir le sol, présente un fort potentiel en tant que mulch vivant pour les cultures céréalières. Ce nouvel usage nécessite de créer des variétés dédiées de luzerne.

Résumé

La luzerne peut servir de plante de couverture pérenne pour naturellement limiter les adventices et apporter de l'azote aux cultures de rente. Cependant, sa croissance vigoureuse induit une compétition excessive avec les cultures de rente. La sélection de variétés de luzerne adaptées au mulch vivant pourrait être une solution pour réduire cette compétition. Nous synthétisons l'état de l'art sur ce sujet.

Les interactions blé-luzerne existent dès les premiers stades du blé jusqu'à sa récolte et sont influencées par les traits morphologiques et phénologiques des variétés de luzerne. La dormance automnale, le port, la hauteur et l'état du couvert de la luzerne déterminent le compromis entre la réduction de la compétition avec le blé et le maintien des services écosystémiques fournis par la luzerne. Une dormance intermédiaire, associée à une hauteur modérée et à un couvert dressé, produit la combinaison la plus favorable.

Les corrélations génétiques entre les caractères mesurés en plantes espacées et en mulch vivant révèlent que certains caractères, comme la hauteur, sont stables entre conditions, tandis que d'autres dépendent des conditions de culture. Cela justifie une stratégie de sélection en deux étapes combinant une sélection indirecte en pépinière de plantes espacées et une sélection directe en condition de mulch vivant. Enfin, les marqueurs moléculaires utilisés en prédiction génomique permettraient d'accélérer l'identification de génotypes adaptés au mulch vivant. Ces connaissances peuvent être utilisées pour créer des variétés adaptées.

Summary

Towards lucerne varieties used as living mulch for cereal crops in agroecological systems

Lucerne, a perennial legume known for its nitrogen fixation, persistence, and soil-covering capacity, shows strong potential as a living mulch for cereal cropping. However, its vigorous growth often results in excessive competition with cash crops. The selection of lucerne varieties adapted to living mulch could be a solution to reduce this competition. We synthesize the state of the art on this subject.

Wheat-lucerne interactions occur from the earliest stages of wheat cycle until its harvest and are mainly driven by lucerne morphological and phenological traits. Autumn dormancy, growth habit, height, and cover state of lucerne determine the trade-off between reducing competition with wheat and maintaining the ecosystem services provided by lucerne. An intermediate dormancy, combined with moderate height and upright cover, appears to provide the most favourable balance.

Genetic correlations between traits measured in spaced plants and living mulch conditions reveal that some traits, such as height, remain stable across designs, whereas others are highly design-dependent. This supports a two-step breeding strategy combining early indirect selection in nursery of spaced plants with an indirect selection under living mulch conditions. Finally, molecular markers used for genomic prediction could accelerate the identification of genotypes suited for living mulch systems. This knowledge can be used to create dedicated varieties.

Auteurs

El Ghazzal Z., Louarn G., Julier B.¹

¹INRAE, URP3F, 86600 LUSIGNAN, FRANCE

Auteur correspondant :
bernadette.julier@inrae.fr

Mots clés

Luzerne ; mulch vivant ; blé ; agroécologie ; sélection variétale ; compétition interspécifique ; sélection génomique

Key words

Lucerne ; living mulch ; wheat ; agroecology ; plant breeding ; interspecific competition ; genomic selection

Références de l'article

El Ghazzal Z., Louarn G., Julier B. (2026). Vers des variétés de luzerne utilisées en tant que mulch vivant pour des cultures de céréales dans des systèmes agroécologiques, *Fourrages* 265, 65-72. <https://doi.org/10.64256/FOU2521>

Article accepté pour publication le 27 avril 2026.

Introduction

Depuis les années 1960, les systèmes agricoles modernes, dits conventionnels, se sont largement appuyés sur une utilisation intensive d'intrants chimiques combinée à une mécanisation croissante et à l'amélioration génétique des cultures (Jacques & Jacques, 2012). Ces innovations ont permis d'atteindre des rendements élevés et de sécuriser la production alimentaire (Tilman, 1999). Toutefois, elles ont également entraîné des pressions environnementales importantes, en particulier la pollution de l'atmosphère, des sols et des eaux ainsi qu'une diminution de la biodiversité fonctionnelle (Steffen *et al.*, 2015), et une consommation excessive d'énergie fossile.

Le défi actuel consiste donc à répondre à une demande alimentaire croissante tout en préservant l'intégrité écologique des agroécosystèmes (Gaba *et al.*, 2015; Wezel *et al.*, 2014). Parmi les leviers proposés, la diversification des cultures occupe une place centrale. Elle peut se mettre en place dans le temps, à travers des rotations culturales, ou dans l'espace, via différentes formes de mélanges culturels (Malézieux *et al.*, 2009). La culture en mélange repose sur la culture simultanée de deux espèces ou plus sur une même parcelle, de façon à ce qu'elles coexistent pendant une partie de leur cycle de croissance. Elle peut prendre différentes formes, en lignes, en bandes ou en mélange semé à la volée, et vise principalement à optimiser l'utilisation de la surface et des ressources disponibles (Malézieux *et al.*, 2009). Cette pratique présente plusieurs avantages : elle permet souvent d'augmenter la production totale par unité de surface, et contribue à limiter la pression des adventices, des maladies et des ravageurs, réduisant ainsi le recours aux pesticides (Brooker *et al.*, 2014; Gaba *et al.*, 2015). Ces bénéfices nécessitent toutefois d'adapter les pratiques de culture, comme l'ajustement des densités et des dates de semis ou le choix d'espèces compatibles grâce à la synchronisation de leurs cycles de développement, de l'implantation à la récolte. La mécanisation peut également être plus difficile (Brooker *et al.*, 2014).

Le choix des espèces est déterminant pour le devenir d'un mélange : la complémentarité entre espèces, qu'elle soit morphologique ou physiologique, favorise une utilisation plus efficace de la lumière, de l'eau et des nutriments (Wezel *et al.*, 2014). Les mélanges entre légumineuses et céréales sont reconnus comme particulièrement efficaces, en raison de la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses, combinée à la forte compétitivité des céréales pour l'absorption de l'azote. Ce principe a été démontré aussi bien pour les cultures annuelles (Ghaley *et al.*, 2005; Mamme et Farès, 2020), que pour les cultures fourragères pérennes (Nyfeler *et al.*, 2011). Au sein de ces mélanges légumineuses-céréales, les associations binaires en mulch vivant constituent un cas particulier, où une céréale est implantée dans une culture d'une légumineuse pérenne qui est maintenue comme couverture, y compris en dehors de la période de culture de la céréale (Hartwig & Ammon, 2002). L'association du blé avec la luzerne est l'un des exemples les plus

étudiés (Coughnon *et al.*, 2022). La luzerne devient alors une plante de services pour le blé.

1. La luzerne en mulch vivant : intérêts, limites et enjeux d'adaptation

1.1. Luzerne comme plante de service

La luzerne présente plusieurs caractéristiques qui en font une plante de service potentiellement pertinente dans les systèmes en mulch vivant. En tant que légumineuse pérenne, elle fixe l'azote atmosphérique via sa symbiose avec *Rhizobium*, contribuant à enrichir durablement le sol en azote et à réduire la dépendance aux engrais minéraux azotés. Son système racinaire pivotant, profond et ramifié, lui confère une forte résilience à la sécheresse et un accès aux ressources profondes (Annicchiarico *et al.*, 2015; Coughnon *et al.*, 2022; Julier *et al.*, 2017). Cette architecture contribue aussi à améliorer durablement la structure du sol et le stockage de carbone (Bhaskar *et al.*, 2021; Leoni *et al.*, 2022).

Comme d'autres espèces de couverts, la luzerne assure une couverture dense et durable du sol, contribuant à limiter son érosion et à atténuer les fluctuations de sa température. De plus, lorsqu'elle est associée à des graminées dans des systèmes d'exploitation en fauche (ex. luzerne-dactyle), sa forte repousse et son couvert dense permettent de réguler efficacement les adventices annuelles et pérennes, contribuant ainsi à une gestion non chimique des adventices (Leoni *et al.*, 2022; Surault *et al.*, 2024; Tahir *et al.*, 2022). Sa vigueur de repousse, combinée à une longévité de quatre à cinq ans, permet de maintenir une couverture vivante continue pendant plusieurs campagnes culturales, ce qui constitue un avantage majeur dans les systèmes à faibles intrants et en agriculture de conservation (Coughnon *et al.*, 2022). Ces avantages de la luzerne en font une bonne candidate pour le mulch vivant en agriculture biologique ou en systèmes de conservation des sols, où le maintien d'un couvert pérenne et la réduction de la dépendance aux intrants de synthèse sont des objectifs prioritaires.

Cependant, les variétés actuelles de luzerne ont été sélectionnées principalement pour la production fourragère. Elles se caractérisent par une forte vigueur végétative, une reprise précoce au printemps, des tiges hautes à port érigé et une production de biomasse élevée. Si ces traits sont avantageux pour maximiser le rendement en fourrage (Hawkins et Yu, 2018; Julier *et al.*, 2017), ils se traduisent, dans le mulch vivant, par une forte compétitivité vis-à-vis du blé. En effet, les deux espèces entrent en compétition pour plusieurs ressources, en particulier l'azote et la lumière (Carof *et al.*, 2007b) mais aussi l'eau. Des pertes de rendement du blé pouvant dépasser 50 %, y compris en conditions de fertilisation azotée élevée, ont été rapportées (Shili-Touzi, 2009).

1.2. Un besoin de création variétale pour les cultures en mulch vivant

Les stratégies actuellement explorées pour réduire la compétitivité de la luzerne en mulch vivant reposent surtout sur des régulations de sa végétation. Le contrôle mécanique, basé sur trois à quatre coupes successives (Arvalis, 2022), permet de limiter la vigueur de la luzerne installée dans les inter-rangs de blé, mais il nécessite un équipement de fauche adapté et un guidage GPS précis pour éviter d'endommager le blé, et engendre des coûts importants en temps et en énergie. Malgré cela, des pertes de rendement subsistent, pouvant atteindre environ 45%. Le contrôle chimique, fondé sur l'application de faibles doses d'herbicides, peut également réduire la repousse de la luzerne et améliorer les rendements du blé ; des doses réduites permettent parfois d'obtenir des niveaux proches du témoin sans mulch (Carof et al., 2007a), et peuvent abaisser les pertes à 33-42 % selon le moment d'application (Shili-Touzi, 2009). Cette approche demeure dépendante de l'usage d'intrants incompatibles avec les objectifs d'agroécologie ou d'agriculture biologique.

Ces limites mettent en évidence la nécessité d'une troisième voie : la diversité génétique de la luzerne (Humphries et al., 2004). En effet, la luzerne présente une remarquable variabilité phénotypique et génétique au sein du complexe *Medicago sativa*, incluant les sous-espèces *sativa* et *falcata*, des populations sauvages et cultivées, diploïdes et tétraploïdes ainsi qu'un continuum de types morpho-physiologiques allant de populations prostrées et très dormantes en hiver à des populations hautes, vigoureuses avec une forte production fourragère (Julier et al., 1995). Cette diversité constitue un réservoir génétique précieux pour concevoir un modèle biologique idéal, défini par une combinaison de traits optimisant les performances dans un environnement donné, appelé idéotype (Donald, 1968). Un idéotype destiné au mulch vivant doit conserver la pérennité et les services écosystémiques de la luzerne tout en exprimant une compétitivité réduite vis-à-vis du blé, afin d'éviter le recours à des régulations chimiques ou mécaniques (Cougnon et al., 2022).

Malgré ce potentiel, aucun programme de sélection n'a, à ce jour, ciblé la réduction de la compétitivité de la luzerne pour un usage en mulch vivant, et aucune étude n'a évalué de manière systématique comment la diversité génétique de l'espèce influence ses interactions avec la culture de rente. Les bases nécessaires pour concevoir des variétés adaptées restent donc encore à établir. Cela implique d'identifier les caractères déterminants de la compétitivité de la luzerne, de définir les dispositifs de sélection les plus appropriés pour les évaluer, puis de comprendre leur déterminisme génétique afin d'envisager leur intégration dans des schémas de sélection.

Pour cet article, nous reprenons les quelques études parfois anciennes ayant testé la diversité génétique de la luzerne en mulch vivant et synthétisons les travaux obtenus récemment dans le cadre d'une thèse (El Ghazzal, 2025). Ces travaux ont porté sur un panel

de 30 accessions représentant une large diversité morphologique et phénologique, allant de types sauvages très dormants en automne avec un port aérien prostré à des types cultivés non dormants et dressés. Ces accessions ont été évaluées pendant deux ans dans deux conditions de culture, un essai en mulch vivant avec une variété de blé tendre d'hiver et une pépinière de plantes espacées.

2. Traits impliqués dans les interactions blé-luzerne

2.1. Traits déterminant la compétition précoce

La compétition pour les ressources entre la luzerne et le blé s'installe précocement, dès les premières semaines suivant l'implantation du blé, et dépend fortement de la dynamique de croissance de la luzerne. La lumière constitue le principal facteur limitant pour la croissance du blé au début du cycle, la compétition atteignant un premier pic durant son tallage, au moment où la luzerne relance activement sa croissance (Amossé et al., 2013). L'élongation rapide des tiges et l'expansion du couvert de luzerne provoquent alors un ombrage marqué des jeunes plants de blé, réduisant la lumière disponible et l'activité photosynthétique. Ce déficit lumineux limite la croissance foliaire et la survie des talles, ce qui conduit à une diminution du nombre de talles et d'épis ainsi que du nombre de grains par épi (Carof et al., 2007a ; Hiltbrunner et Liedgens, 2008).

Dans ce contexte, la dormance automnale et le port aérien de la luzerne apparaissent comme deux déterminants majeurs de l'intensité de la compétition précoce. Les résultats obtenus sur le panel de 30 accessions représentant une large diversité morphologique et phénologique, montrent qu'une dormance automnale plus élevée, correspondant à une croissance réduite en période hivernale et une reprise de croissance plus tardive au printemps, est associée positivement à une hauteur plus importante du blé aux premiers stades de sa croissance (Figure 1). De la même manière, les types prostrés, dont la canopée reste basse, favorisent une croissance initiale plus régulière du blé. En revanche, les types dressés accentuent l'ombrage et réduisent la hauteur et la vigueur précoce du blé (El Ghazzal et al., 2025). Ces effets précoces influencent directement le rendement en grains du blé, les accessions de luzerne à faible dormance et à port dressé réduisent davantage le rendement, alors que les accessions plus dormantes ou à port étalé atténuent ces pertes.

Cependant, ces mêmes traits exercent un effet inverse sur les adventices. Les accessions de luzerne à faible dormance et à port dressé limitent la croissance des adventices, en générant un couvert rapide et dense qui réduit fortement la lumière atteignant le sol. À l'inverse, des accessions plus dormantes ou prostrées, qui minimisent la compétition avec le blé, tendent aussi à réduire la capacité de la luzerne à contrôler les adventices.

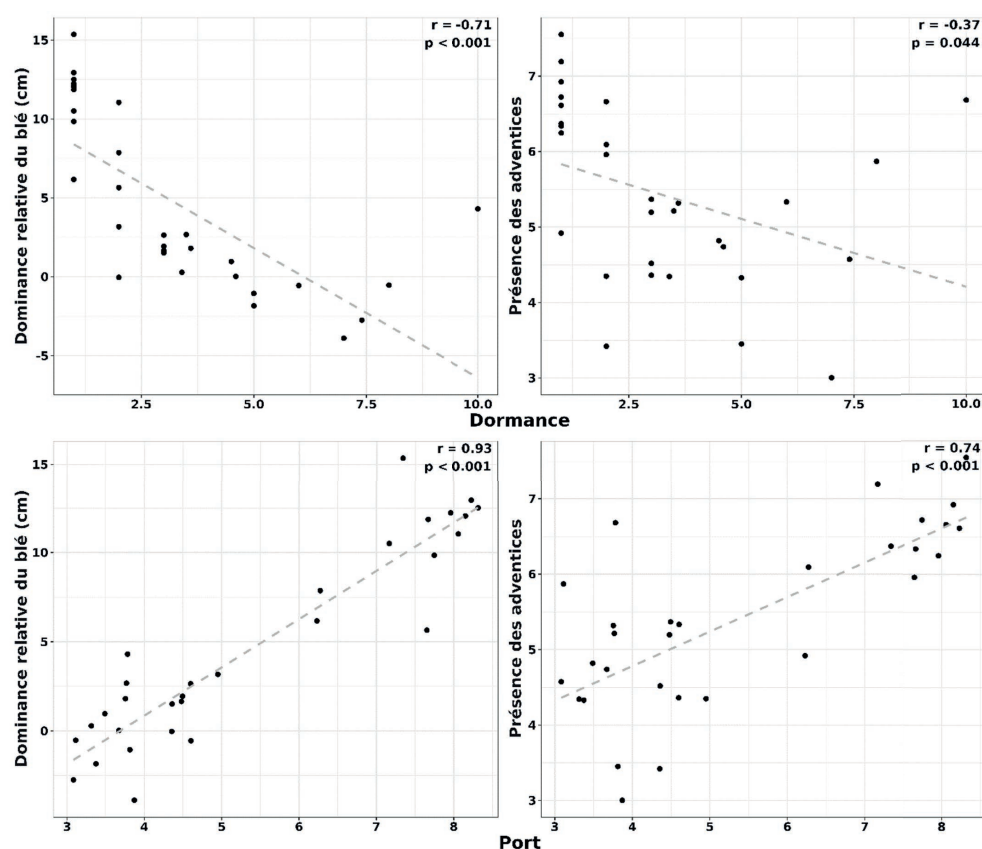


Figure 1. Effet de la dormance et du port de la luzerne sur la dominance relative du blé et la présence des adventices au stade de tallage du blé. La dormance de la luzerne est notée de 1 (très dormant) à 10 (non dormant), le port de croissance de 1 (dressé) à 9 (prostré), La dominance relative du blé correspond à la différence cumulée de croissance en hauteur entre le blé et la luzerne jusqu'au stade de tallage. La présence des adventices est notée de 1 (absence) à 9 (≈70 % de la parcelle envahie), (El Ghazzal *et al.*, 2025).

Cette opposition souligne l'existence d'un compromis central dans la conception de l'idéotype de luzerne pour mulch vivant : limiter la compétition avec le blé tout en conservant un niveau suffisant de couvert pour contenir les adventices (El Ghazzal *et al.*, 2025).

2.2. Traits déterminant la compétition en cours de cycle

Après cette phase précoce de croissance du blé, la compétition pour la lumière se poursuit. S'y rajoute une compétition pour l'azote, mise en évidence au début de la floraison du blé, moment où la fourniture d'azote détermine la teneur en protéines des grains. Des résultats expérimentaux montrent que le transfert d'azote de la luzerne vers le sol reste très limité durant la première saison de la luzerne, ce qui contraint fortement la formation du rendement en grains (Shili-Touzi, 2009). Il est également important de noter que la fixation d'azote chez la luzerne est proportionnelle à sa biomasse ; ainsi, lors des saisons suivantes, des plantes plus vigoureuses fixent davantage d'azote que les plantes plus faibles, telles que celles de l'année d'implantation (Louarn *et al.*, 2015).

La hauteur de la luzerne au stade de floraison du blé s'est révélée être un indicateur majeur des interactions entre les deux espèces (El Ghazzal *et al.*, 2025). À ce stade critique, la biomasse accumulée et le statut azoté des feuilles supérieures, dont la concentration en azote est fortement liée à l'état nutritionnel global de la plante vont en grande partie déterminer le rendement du blé (Barillot *et al.*, 2016; Kichey *et al.*, 2007; Louarn *et al.*, 2020). La relation

entre la hauteur de la luzerne et la biomasse du blé au stade de floraison du blé variaient selon les années de culture (El Ghazzal *et al.*, 2025). Elle était négative la première année, les accessions de faible vigueur permettant au blé d'être dominant, d'intercepter le rayonnement lumineux et d'accumuler davantage de biomasse. En revanche, la relation entre la hauteur de la luzerne et la biomasse du blé était positive la deuxième année, via un effet indirect où une luzerne plus vigoureuse en première année contribuait à enrichir le sol en azote (Louarn *et al.*, 2015). Cette dynamique se retrouvait également dans l'indice de nutrition azotée (INN), positivement corrélé à la hauteur de la luzerne malgré un stress azoté marqué (INN entre 0,21 et 0,77) (El Ghazzal *et al.*, 2025).

L'ensemble de ces éléments montre que l'intensité de la compétition au cours du cycle dépend non seulement de la phénologie, caractérisée par la dormance automnale, mais aussi de traits morphologiques de la luzerne déterminant la production de biomasse et indirectement à l'accumulation d'azote dans la culture de blé tendre.

2.3. Traits influençant la fin de cycle et la récolte du blé

Un autre facteur de perte de rendement, particulièrement marqué au moment de la récolte, est l'état du couvert de la luzerne (Hiltbrunner, 2007). L'état du couvert est fortement influencé par le port, dressé ou prostré, la hauteur et la structure des tiges de la luzerne. Les types dressés, généralement plus hauts et plus

vigoureux, présentent un risque accru de verse. À l'inverse, les types prostrés restent au ras du sol (Tang et al., 2022).

Ces différences morphologiques se traduisent clairement dans les performances observées en fin de cycle : les quelques accessions de luzerne qui ont permis au blé de dominer en hauteur, étaient les moins dressées. L'état du couvert de luzerne a également influencé négativement la biomasse du blé, mais uniquement lors de la première année (Figure 2), alors que la corrélation n'était pas significative en deuxième année. En deuxième année, la variabilité pour l'état du couvert était faible, limitant la capacité à détecter des relations robustes (El Ghazzal et al., 2025).

2.4. Vers un idéotype de luzerne pour mulch vivant

Dans une association blé-luzerne, l'interaction entre les deux espèces est continue tout au long du cycle, depuis l'installation du blé jusqu'à la récolte. L'idéotype recherché repose donc sur une combinaison spécifique de traits permettant de limiter la compétition tout en maintenant les services fournis par la luzerne.

Au stade précoce, la luzerne devrait présenter une dormance intermédiaire avec un couvert plutôt dressé, afin de limiter l'ombrage du blé lors des phases critiques de mise en place du nombre de talles tout en conservant un niveau de couverture du sol suffisant pour freiner les adventices. Au cours du cycle, à partir du stade d'élongation du blé, une croissance en hauteur modérée de la luzerne contribueraient à réduire la compétition pour la lumière avec le blé, tout en permettant à la luzerne de fixer suffisamment d'azote pour diminuer la dépendance de l'association aux apports d'intrants azotés. En fin de cycle, l'idéotype devrait aussi rester dressé, condition essentielle pour préserver la récolte du blé mais aussi pour faciliter les opérations mécaniques au moment de la moisson.

3. Stratégies de sélection et d'évaluation de la luzerne en mulch vivant

3.1. Effets du dispositif d'évaluation sur l'expression des caractères

Les programmes de sélection de la luzerne ont historiquement été construits pour une production fourragère, où ils ont privilégié des caractères tels que la vigueur, la croissance précoce, la hauteur et le port dressé, qui assurent un rendement élevé en monoculture (Lonnet, 1996). Cette sélection a conduit à créer des variétés agressives, peu adaptées aux exigences du mulch vivant, où la coexistence avec la culture de rente est déterminante (Grieder et al., 2021).

Les essais classiques en culture pure ne permettent pas de capturer les interactions interspécifiques, compétition, complémentarité, et facilitation, qui gouvernent la performance en association (Annicchiarico et al., 2019; Bourke et al., 2021), ni la plasticité des traits exprimés en mélange (Moore et al., 2022). Plusieurs travaux ont montré que les performances des génotypes de luzerne et l'expression de traits diffèrent fortement entre la monoculture et les associations, avec des modifications de classement et des interactions génotype $\times$ milieu marquées (Maamouri et al., 2015, 2017). Ces résultats indiquent que la performance en monoculture n'est pas toujours prédictive de la performance en mélange (Grieder et al., 2021; Surault et al., 2024).

Dans ce contexte, la sélection pour le mulch vivant nécessite de passer d'une logique centrée sur la performance en culture pure à une sélection orientée vers la performance de l'association. Deux stratégies émergent alors : la sélection directe, réalisée en conditions d'association en mulch vivant avec le blé, et la sélection indirecte, basée sur des plantes espacées. Leur efficacité dépend de la corrélation génétique entre les performances exprimées dans les deux environnements. Une corrélation élevée permet d'utiliser les

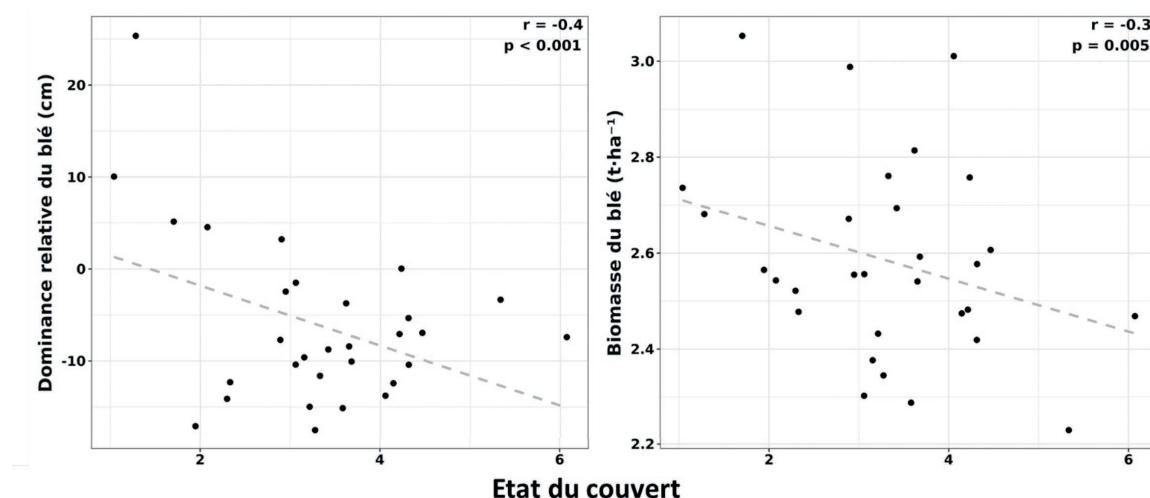


Figure 2. Effet de l'état de couvert de luzerne sur la dominance relative du blé à la floraison en année 1 (gauche) et sur la biomasse (droite). L'échelle de notation de l'état du couvert de luzerne varie de 1 (plantes dressées) à 9 (plantes totalement couchées).

mesures sur les plantes espacées comme proxys fiables, d'autant que ce dispositif permet d'étudier un grand nombre de génotypes ; une corrélation faible rend indispensable une évaluation directe en mulch vivant pour capturer les interactions fonctionnelles entre espèces (Bourke *et al.*, 2021; Dubey *et al.*, 2024 ; Sampoux *et al.*, 2020).

3.2. Optimiser la sélection : indirecte vs directe

La comparaison de l'expression des caractères mesurés sur les plantes espacées et sur les plantes cultivées en mulch vivant a montré des réponses très contrastées selon les traits. Les caractères liés à la hauteur, que ce soit hauteur précoce en automne (indicateur de la dormance) et hauteur maximale en mai, ont présenté des corrélations génétiques fortes et positives entre modalités, indiquant un classement des accessions largement conservé entre plantes espacées et mulch vivant (Figure 3). À l'inverse, l'état du couvert de luzerne (dressé ou couché), qu'il soit lié à un port naturellement très prostré ou à la verse des accessions dressées, est apparu comme le caractère le plus sensible au changement de dispositif, les corrélations entre plantes espacées et mulch vivant étaient faibles ou négatives, illustrant un reclassement net des accessions entre dispositifs (El Ghazzal, 2025).

D'autres corrélations importantes ont aussi été dégagées. Les hauteurs précoces et maximales mesurées en plantes espacées étaient positivement associées à l'état du couvert en conditions de mulch vivant, montrant que ces traits peuvent servir de critères pour une sélection précoce du comportement en association. Ces résultats indiquent qu'une stratégie efficace consiste à débiter la sélection en plantes espacées pour les traits stables et hautement héritables (hauteur, dormance), puis à compléter l'évaluation en mulch vivant pour les traits sensibles à la compétition (état du couvert), afin de capter l'ensemble des caractères pertinents pour l'idéotype (El Ghazzal, 2025).

3.3. Atouts de la sélection génomique dans l'amélioration de la luzerne

Au-delà de l'identification des traits pertinents et de leur comportement selon le dispositif d'évaluation, les approches utilisant les données génétiques pourraient être une opportunité majeure pour accélérer la sélection d'idéotypes adaptés au mulch vivant. Elles permettent d'exploiter simultanément l'ensemble des loci contrôlant des caractères quantitatifs et de réduire fortement la durée des cycles d'évaluation. Sur la luzerne, plusieurs études ont déjà rapporté des capacités prédictives modérées à élevées pour des caractères complexes tels que la dormance, la hauteur ou le rendement, confirmant l'intérêt de cette approche dans une espèce autotétraploïde à large diversité (Annicchiarico *et al.*, 2015 ; Pégard *et al.*, 2023).

Dans notre étude, les trois traits clés, dormance, hauteur maximale et état du couvert, ont montré des valeurs de prédiction génomique cohérentes avec leurs héritabilités. La dormance présentait une prédictibilité intermédiaire ($\approx 0,45-0,55$), en accord avec son héritabilité également intermédiaire, ce qui indique que la sélection génomique peut accélérer son amélioration, tout en conservant une précision suffisante pour identifier correctement les génotypes les plus performants. La hauteur maximale présentait les valeurs de prédiction les plus élevées ($\approx 0,60-0,75$), en lien avec son héritabilité élevée, ce qui confirme qu'il s'agit d'un trait particulièrement favorable à une sélection précoce assistée par marqueurs. À l'inverse, l'état du couvert présentait des valeurs de prédiction plus modestes ($\approx 0,25-0,40$), en lien avec sa plus forte dépendance aux interactions compétitives et aux conditions du mulch vivant, mais néanmoins exploitables dans le cadre d'une sélection combinée (El Ghazzal, 2025).

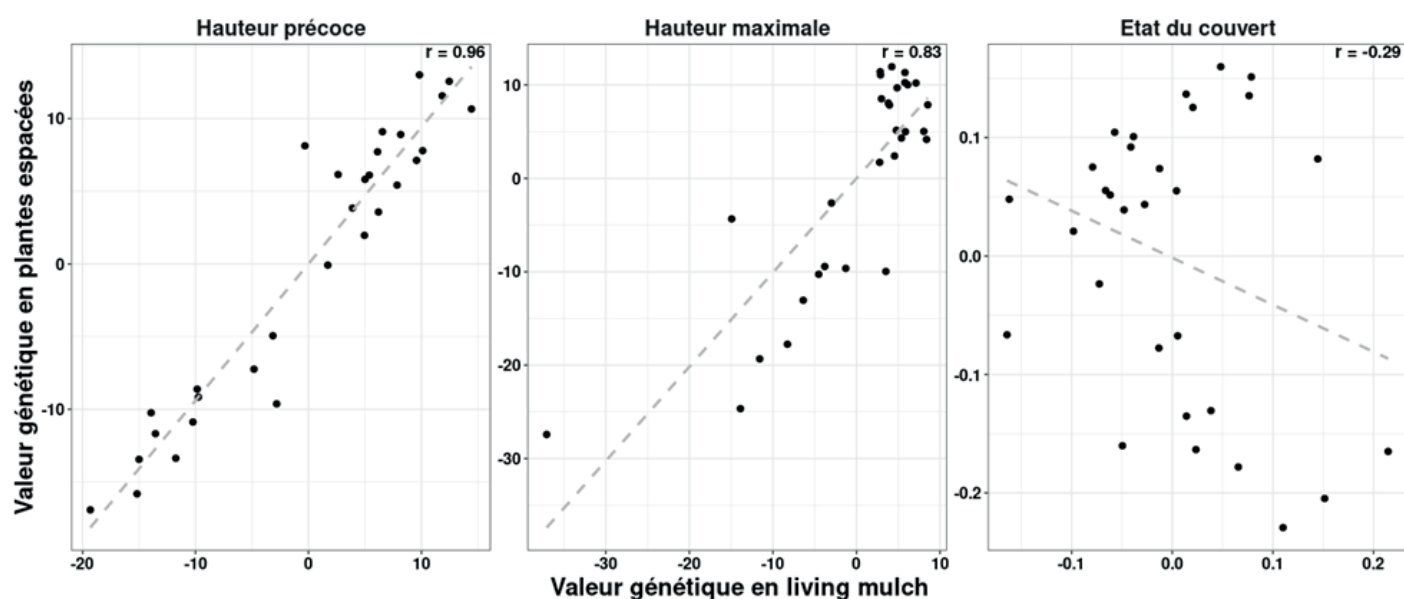


Figure 3. Corrélations génétiques entre plantes espacées et mulch vivant pour les traits de l'idéotype de luzerne mulch vivant (El Ghazzal, 2025).

Conclusion

La performance de la luzerne en mulch vivant repose sur un compromis permettant de limiter la compétition avec le blé tout en maintenant les services écosystémiques fournis par le couvert végétal. Les interactions blé-luzerne varient au cours du temps et sont principalement gouvernées par des traits morphologiques et phénologiques des accessions de luzerne, dont la dormance automnale, la hauteur et l'état du couvert, dressé ou couché. Il est nécessaire d'adapter les stratégies de sélection, en combinant des évaluations en plantes espacées et en conditions de mulch vivant. La sélection génomique constitue un levier prometteur pour accélérer la création d'un idéotype de luzerne compatible avec les systèmes de cultures en mulch vivant.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le département BAP d'INRAE, la région Nouvelle-Aquitaine (projet Mobilus AAPR2022A-2022-17420110) et l'Agence Nationale pour la Recherche (projets MOBIDIV - ANR 20-PCPA-0006 et CoBreeding ANR 22-PEAE-0003).

Référence bibliographiques

- Annicchiarico, P., Barrett, B., Brummer, E. C., Julier, B., & Marshall, A. H. (2014). *Achievements and Challenges in Improving Temperate Perennial Forage Legumes*.
- Annicchiarico, P., Collins, R. P., De Ron, A. M., Firmat, C., Litrico, I., & Hauggaard-Nielsen, H. (2019). Chapter Three—Do we need specific breeding for legume-based mixtures? In D. L. Sparks (Éd.), *Advances in Agronomy* (Vol. 157, p. 141-215). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.04.001>
- Annicchiarico, P., Nazzicari, N., Li, X., Wei, Y., Pecetti, L., & Brummer, E. C. (2015). Accuracy of genomic selection for alfalfa biomass yield in different reference populations. *BMC Genomics*, 16(1), 1020. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-2212-y>
- Arvalis. (2022, juin 30). *Résultats d'essais—Conduire un couvert permanent en AB grâce au guidage de précision*. ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/conduire-un-couvert-permanent-en-ab-grace-au-guidage-de-precision>
- Barillot, R., Chambon, C., & Andrieu, B. (2016). CN-Wheat, a functional-structural model of carbon and nitrogen metabolism in wheat culms after anthesis. II. Model evaluation. *Annals of Botany*, 118(5), 1015-1031. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw144>
- Bhaskar, V., Westbrook, A. S., Bellinder, R. R., & DiTommaso, A. (2021). Integrated management of living mulches for weed control: A review. *Weed Technology*, 35(5), 856-868. <https://doi.org/10.1017/wet.2021.52>
- Bourke, P. M., Evers, J. B., Bijma, P., van Apeldoorn, D. F., Smulders, M. J. M., Kuyper, T. W., Mommer, L., & Bonnema, G. (2021). Breeding Beyond Monoculture: Putting the "Intercrop" Into Crops. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.734167>
- Brooker, R. W., Bennett, A. E., Cong, W., Daniell, T. J., George, T. S., Hallett, P. D., Hawes, C., Iannetta, P. P. M., Jones, H. G., Karley, A. J., Li, L., McKenzie, B. M., Pakeman, R. J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C. A., Zhang, C., ... White, P. J. (2014). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107-117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>
- Carof, M., de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D., & Roger-Estrade, J. (2007a). Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. I. Yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(4), 347-356. <https://doi.org/10.1051/agro:2007016>
- Carof, M., de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D., & Roger-Estrade, J. (2007b). Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(4), 357-365. <https://doi.org/10.1051/agro:2007017>
- 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(6), 110. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00844-x>
- Dubey, R., Zustovi, R., Landschoot, S., Dewitte, K., Verlinden, G., Haesaert, G., & Maenhout, S. (2024). Harnessing monocrop breeding strategies for intercrops. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1394413>
- El Ghazzal, Z. (2025). *Conception d'un idéotype de luzerne pour un usage de mulch vivant au service des cultures de rente et étude génétique des caractères impliqués* [Phdthesis, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)]. <https://hal.inrae.fr/tel-05515886>
- El Ghazzal, Z., Louarn, G., Surault, F., Barillot, R., Pégard, M., Grumel, A., & Julier, B. (2025). Lucerne genetic diversity for living mulch: Identifying key traits and evaluating their impacts on wheat development. *Crop and Pasture Science*, 76(6). <https://doi.org/10.1071/CP25012>
- Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E.-P., Navas, M.-L., Wery, J., Louarn, G., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M., & Ozier-Lafontaine, H. (2015). Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: From concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 607-623. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z>
- Ghaley, B. B., Hauggaard-Nielsen, H., Høgh-Jensen, H., & Jensen, E. S. (2005). Intercropping of Wheat and Pea as Influenced by Nitrogen Fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73(2), 201-212. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-2475-9>
- Grieder, C., Kempf, K., & Schubiger, F. X. (2021). Breeding Alfalfa (*Medicago sativa* L.) in Mixture with Grasses. *Sustainability*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/su13168929>
- Hartwig, N. L., & Ammon, H. U. (2002). Cover crops and living mulches. *Weed Science*, 50(6), 688-699. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050%5B0688:AIACCA%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050%5B0688:AIACCA%5D2.0.CO;2)
- Hawkins, C., & Yu, L.-X. (2018). Recent progress in alfalfa (*Medicago sativa* L.) genomics and genomic selection. *The Crop Journal*, 6(6), 565-575. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.01.006>
- Hiltbrunner, J. (2007). Response of Weed Communities to Legume Living Mulches in Winter Wheat—Hiltbrunner—2007—Journal of Agronomy and Crop Science—Wiley Online Library. *Journal of Agronomy and Crop Science*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-037X.2007.00250.x>
- Hiltbrunner, J., & Liedgens, M. (2008). Performance of Winter Wheat Varieties in White Clover Living Mulch. *Biological Agriculture & Horticulture*, 26(1), 85-101. <https://doi.org/10.1080/01448765.2008.9755071>
- Humphries, A. W., Latta, R. A., Auricht, G. C., & Bellotti, W. D. (2004). Overcropping lucerne with wheat: Effect of lucerne winter activity on total plant production and water use of the mixture, and wheat yield and quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(8), 839. <https://doi.org/10.1071/AR03250>
- Jacques, P. J., & Jacques, J. R. (2012). Monocropping Cultures into Ruin: The Loss of Food Varieties and Cultural Diversity. *Sustainability*, 4(11), 1-28.
- Julier, B., Gastal, F., Louarn, G., Badenhausser, I., Annicchiarico, P., Crocq, G., Chatelier, D. L., Guillemot, E., & Emile, J. C. (2017). Lucerne (alfalfa) in European cropping systems. In D. Murphy-Bokern, F. L. Stoddard, & C.

- A. Watson (Éds.), *Legumes in cropping systems* (1^{re} éd., p. 168-192). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780644981.0168>
- Julier, B., Porcheron, A., Ecalle, C., & Guy, P. (1995). Genetic variability for morphology, growth and forage yield among perennial diploid and tetraploid lucerne populations (*Medicago sativa* L.). *Agronomie*, 15(5), 295-304. <https://doi.org/10.1051/agro:19950505>
- Kichey, T., Hirel, B., Heumez, E., Dubois, F., & Le Gouis, J. (2007). In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Research*, 102(1), 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.01.002>
- Leoni, F., Lazzaro, M., Ruggeri, M., Carlesi, S., Meriggi, P., & Moonen, A. C. (2022). Relay intercropping can efficiently support weed management in cereal-based cropping systems when appropriate legume species are chosen. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), 75. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00787-3>
- Li, X., & Brummer, E. C. (2012). Applied Genetics and Genomics in Alfalfa Breeding. *Agronomy*, 2(1), 40-61. <https://doi.org/10.3390/agronomy2010040>
- Lonnet, P. (1996). Objectifs et critères actuels de la sélection des luzernes pérennes. *Fourages*, (147), 303-308.
- Louarn, G., Chabbi, A., & Gastal, F. (2020). Nitrogen concentration in the upper leaves of the canopy is a reliable indicator of plant N nutrition in both pure and mixed grassland swards. *Grass and Forage Science*, 75(1), 127-133. <https://doi.org/10.1111/gfs.12466>
- Louarn, G., Pereira-Lopès, E., Fustec, J., Mary, B., Voisin, A.-S., De Faccio Carvalho, P. C., & Gastal, F. (2015). The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality. *Plant and Soil*, 389(1-2), 289-305. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2354-8>
- Maamouri, A., Louarn, G., Béguier, 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 and Pasture Science*, 68(11), 942-951. <https://doi.org/10.1071/CP17052>
- Maamouri, A., Louarn, G., Gastal, F., Béguier, V., & Julier, B. (2015). Effects of lucerne genotype on morphology, biomass production and nitrogen content of lucerne and tall fescue in mixed pastures. *Crop and Pasture Science*, 66(2), 192-204. <https://doi.org/10.1071/CP14164>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., de Tourdonnet, S., & Valantin-Morison, M. (2009). *Mixing Plant Species in Cropping Systems: Concepts, Tools and Models: A Review*.
- Mamine, F., & Farès, M. (2020). Barriers and Levers to Developing Wheat-Pea Intercropping in Europe: A Review. *Sustainability*, 12(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/su12176962>
- Moore, V. M., Schlautman, B., Fei, S., Roberts, L. M., Wolfe, M., Ryan, M. R., Wells, S., & Lorenz, A. J. (2022). Plant Breeding for Intercropping in Temperate Field Crop Systems: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 843065. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.843065>
- Nyfelner, 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(1), 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.022>
- Pégard, M., Barre, P., Delaunay, S., Surault, F., Karagić, D., Milić, D., Zorić, M., Ruttink, T., & Julier, B. (2023). Genome-wide genotyping data renew knowledge on genetic diversity of a worldwide alfalfa collection and give insights on genetic control of phenology traits. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1196134>
- Sampoux, J.-P., Giraud, H., & Litrico, I. (2020). Which Recurrent Selection Scheme To Improve Mixtures of Crop Species? Theoretical Expectations. *G3 Genes|Genomes|Genetics*, 10(1), 89-107. <https://doi.org/10.1534/g3.119.400809>
- Shili-Touzi, I. (2009). *Analyse du fonctionnement d'une association de blé d'hiver (Triticum aestivum L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation* [These de doctorat, AgroParisTech]. <https://theses.fr/2009AGPT0082>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Surault, F., Huyghe, C., Sampoux, J.-P., Larbre, D., Barre, P., Louarn, G., & Julier, B. (2024). Weed control, protein and forage yield of seven grass species in lucerne-grass associations. *Field Crops Research*, 309, 109308. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109308>
- Tahir, M., Li, C., Zeng, T., Xin, Y., Chen, C., Javed, H. H., Yang, W., & Yan, Y. (2022). Mixture Composition Influenced the Biomass Yield and Nutritional Quality of Legume-Grass Pastures. *Agronomy*, 12(6), 1449. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061449>
- Tang, W., Guo, H., Baskin, C. C., Xiong, W., Yang, C., Li, Z., Song, H., Wang, T., Yin, J., Wu, X., Miao, F., Zhong, S., Tao, Q., Zhao, Y., & Sun, J. (2022). Effect of Light Intensity on Morphology, Photosynthesis and Carbon Metabolism of Alfalfa (*Medicago sativa*) Seedlings. *Plants*, 11(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/plants11131688>
- Tilman, D. (1999). Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96 11, 5995-6000. <https://doi.org/10.1073/PNAS.96.11.5995>
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>