



HAL
open science

Livre blanc ” la gestion des adventices : quels traits et fonctions agroécologiques pour les plantes ? ”

Jean Marc Audergon, Philippe Barre, Nathalie Colbach, P Debaeke, Mylène Durand Tardif, Laurence Fontaine, Philippe Gate, Arnaud Gauffreteau, Stéphane Jézéquel, Fabien Lecouviour, et al.

► To cite this version:

Jean Marc Audergon, Philippe Barre, Nathalie Colbach, P Debaeke, Mylène Durand Tardif, et al.. Livre blanc ” la gestion des adventices : quels traits et fonctions agroécologiques pour les plantes ? ”. [Rapport Technique] PlantAlliance. 2022. hal-03624240

HAL Id: hal-03624240

<https://hal.inrae.fr/hal-03624240v1>

Submitted on 4 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Livre blanc

Mars 2022

La gestion des adventices : quels traits et fonctions agro- écologiques pour les plantes ?

Auteurs

Jean-Marc Audergon (INRAE), Philippe Barre (INRAE), Nathalie Colbach (INRAE), Philippe Debaeke (INRAE), Mylène Durand-Tardif (PlantAlliance), Laurence Fontaine (GEVES), Philippe Gate (Arvalis), Arnaud Gauffreteau (INRAE), Stéphane Jézéquel (Arvalis), Fabien Lecouviour (Limagrain), Rémi Perronne (INRAE)

Ce document est issu de réflexions menées au sein du Groupe de Travail conjoint PlantAlliance-GIS GC HP2E « agronomie-génétique » incluant les auteurs et :

Jean-Pierre Cohan (Arvalis), Philippe Dufour (RAGT 2n), Julie Gombert (GEVES), Fabien Masson (GEVES), Fabienne Maupas (ITB), Monica Menz (Innolea), Laurence Moreau (INRAE), Maxime Szambien (PlantAlliance)

Sommaire

Sommaire	Page 2
Glossaire	Page 3
1- Contexte et objectifs	Page 4
2- Quelles approches méthodologiques ?	Page 5
3- Pouvoir concurrentiel, en particulier pouvoir couvrant	Page 5
4- Comportement de l'espèce cultivées vis-à-vis de l'apport azoté	Page 7
5- Décalage des semis d'automne	Page 9
5.1- Aptitude aux semis tardifs pour les céréales à pailles	Page 9
5.2- Aptitude à des semis plus précoces (colza)	Page 11
6- Intérêt des espèces de printemps dans la gestion des adventices	Page 12
7- Blé et autres céréales pérennes	Page 14
8- Aptitude au contrôle mécanique de l'équilibre culture/couvert/adventices	Page 14
8.1- Aptitude à être cultivée en peuplement dense et/ou écartement étroit	Page 15
8.2- Aptitude à lever sous mulch	Page 16
9- Allélopathie	Page 16
10- Cas des associations d'espèces récoltées	Page 16
11- Cultures sous couverts : «mulchs vivants»	Page 17
11.1- Culture de rente	Page 17
11.2- Couverts	Page 17
12- Conclusion	Page 18
Bibliographie	Page 20

Glossaire

Allélopathie : effet d'un organisme sur un autre organisme par la production de composés chimiques libérés dans l'environnement

Aker : PIA, Innover pour une filière française durable : Réinvestir la diversité allélique de la betterave par le développement de nouveaux outils -omics et de nouvelles stratégies de sélection

Arvalis-Institut du Végétal : Institut Technique Agricole de recherche appliquée, dédié aux grandes cultures

FSOV : fonds de soutien à l'obtention végétale

FSOV 2006 B : Des variétés rustiques concurrentes des adventices pour l'agriculture durable

FSOV 2012 N : Caractérisation et sélection de variétés de blé tendre plus compétitives vis-à-vis des adventices,

FSOV 2020 Q : Amélioration de la compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices pour l'agriculture biologique

GDEC : Génétique Diversité Ecophysiologie des Céréales (Unité Mixte de Recherche INRAE)

ISARA : Institut Supérieur de l'Agriculture Rhône-Alpes

Mulch : paillis

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index, Indice de végétation par différence normalisé, indicateur de la quantité de chlorophylle et de la vigueur des plantes

NUE : Nitrogen Use Efficiency Efficacité d'utilisation de l'azote

PIA : Programme d'Investissement d'Avenir

Phenome : PIA, Réseau français de phénomique végétale

Proxy : variable de substitution corrélée à un trait

QTL : Quantitative Trait Locus, locus pour un trait quantitatif

Rapsodyn : PIA, Optimisation de la teneur et du rendement en huile chez le colza cultivé sous contrainte azotée : accélération de la sélection de variétés adaptées grâce à des approches de génétique et de génomique

Relay cropping : système de culture permettant deux cultures par an, en semant la culture d'été dans la culture d'hiver

Sunrise : PIA, Ressources génétiques de tournesol pour l'amélioration de la stabilité de production d'huile sous contrainte hydrique

1- Contexte et objectifs

La mobilisation de toutes les composantes des productions végétales sera nécessaire pour mettre en œuvre les agricultures de demain qui devront assurer simultanément la reconnaissance du travail des agriculteurs, la performance des systèmes de culture et de production et leur durabilité économique, sociale, environnementale et sanitaire.

Dans ce contexte le consortium public-privé PlantAlliance s'allie au Groupement d'Intérêt Scientifique Grande Culture à Hautes Performances Economiques et Environnementale (GIS GC HP2E) pour optimiser les travaux des scientifiques généticiens et agronomes. Un groupe de travail est constitué afin de combiner ces deux disciplines pour une gestion durable et intégrée des adventices dans de nouveaux systèmes de culture et de production.

Actuellement, des agriculteurs sont devant des impasses imminentes ou connaissent des difficultés accrues face à l'apparition de résistances aux herbicides, aux contraintes réglementaires pour la réduction des intrants, au recours au travail mécanique nécessaire et complémentaire, aux aléas du dérèglement climatique... Nous formulons l'hypothèse que la combinaison des leviers génétiques et agronomiques permettra de mettre à profit des régulations biologiques et de surmonter ces difficultés tout en contribuant à la préservation des sols, de la qualité de l'eau, de la biodiversité, en répondant aux aspirations de la société en général et des agriculteurs en particulier.

Divers systèmes de culture envisageables seront évoqués, caractérisés par une diversité accrue, incluant les rotations, les cultures en relais, les cultures en mélange, les cultures sous couvert détruits ou sous couverts permanents..., sans oublier la diversification à l'échelle du paysage. Les systèmes de cultures pérennes seront aussi considérés. Pour chaque système dans son pédoclimat, les fonctions recherchées pour les plantes à récolter et si besoin les plantes de couverts, afin **d'assurer le succès de la culture de rente et la maîtrise de la gestion des adventices** seront identifiées. Pour chaque fonction, les traits à rechercher et les indicateurs de phénotypage seront proposés pour leur intégration dans un schéma d'amélioration génétique. À ce titre, une réflexion sera menée sur les règles d'assemblage des différents constituants semés dans une parcelle simultanément (mélanges) ou au cours du temps (rotation).

Pour tous ces traits et selon les espèces, le potentiel des **ressources génétiques**, l'aptitude des **variétés**, des **populations**, des **hybrides**... pourra être pris en compte. Les **espèces peu cultivées** jusqu'à présent pourraient être valorisées dans des systèmes de culture innovants dès lors qu'elles apportent des effets significatifs de prophylaxie. De tels atouts, accompagnés par la promotion d'une sélection de ces espèces orphelines pourraient alors susciter l'émergence de nouveaux débouchés.

Le développement des méthodes de **phénotypage** et/ou de procédures d'évaluation des traits seront aussi proposés.



2- Quelles approches méthodologiques ?

Ce document traite de la production d'espèces de rente, dans plusieurs systèmes de culture qui peuvent mettre en jeu des espèces associées, en rotation, en relais, en couvert permanent.

Une interrogation préalable est alors posée sur la méthodologie à employer, qu'il s'agisse de pratiques agronomiques à activer, à combiner en amont, de phénotypage ou de sélection. Faut-il phénotyper indépendamment les espèces sur la base de critères spécifiques qui sont liés à leurs comportements en mélanges ou n'est-il pas plus judicieux de phénotyper directement les mélanges ou les associations ? Est-il préférable de travailler espèce par espèce, voire variété par variété, ou bien d'étudier plusieurs espèces/varieties au sein des divers systèmes de culture choisis ? Le premier cas a l'avantage d'être mieux maîtrisé d'un point de vue expérimental mais risque de ne pas refléter la diversité des situations en exploitations. Le second apparaît plus pragmatique mais fortement limité en ampleur, par le nombre de tests pratiquement réalisables. Une meilleure compréhension des interactions entre plantes associées (via les outils de modélisation, les modèles de fonctionnement) et notamment leurs degrés de dépendance à des conditions locales, pourrait-elle appuyer les choix méthodologiques, donner des règles d'interprétation pour décliner des références acquises à d'autres situations ?

Dans le prolongement, se pose donc la question essentielle de l'échelle spatiale à laquelle doivent être menées ces recherches. La réflexion doit-elle s'opérer à un niveau macro, sur le territoire national, voire européen, pour une généralisation des résultats obtenus ? Ou bien au niveau régional, prenant en compte les spécificités des parcelles et du microclimat ? En effet, comment considérer la diversité des environnements et conditions de culture, dans la mesure où elles influencent les pratiques agronomiques et les choix de cultivars favorisant la maîtrise des adventices ?

Le développement d'un phénotypage adapté participera à guider la sélection et les choix variétaux et sera donc abordé dans ce document. En effet, la mise au point de techniques et de capteurs nouveaux, l'acquisition, le traitement et la gestion de données massives sont utiles, voire nécessaires à la connaissance des traits et donc des fonctions citées. Les méthodes de phénotypage haut débit issues du projet Phenome, mais aussi de Rapsodyn (colza), d'Aker (betterave) ou de Sunrise (tournesol), permettent d'envisager des applications opérationnelles sur un grand nombre d'espèces. En effet, des vecteurs comme la Phenomobile, des drones couplés à des capteurs de traitement d'images automatisé et d'autres outils en développement permettent d'estimer de manière dynamique certains paramètres biophysiques clés de la

culture, lesquels fournissent des variables de substitution corrélées (nommées proxys) au taux de couverture, à la vitesse de croissance, etc. En utilisant des dispositifs qui fonctionnent en conditions environnementales variées (températures froides, état hydrique du lit de semences, travail du sol...), il devient à la fois possible d'accéder à des valeurs de performance et de stabilité sur des processus précis et unitaires (germination, levée...) et plus globaux (pouvoir couvrant, capacité à maintenir un indice foliaire vert en fin de cycle...).

Pour les cultures de rente, les couverts et les systèmes sous couvert permanent, il est proposé de lister les grandes stratégies pour le contrôle des adventices, les traits et les pratiques agronomiques associés à la mise en œuvre de ces stratégies ainsi que leur compatibilité et incompatibilité avec d'autres stratégies ou pratiques.

3- Pouvoir concurrentiel, en particulier pouvoir couvrant

Par pouvoir couvrant, il est entendu la capacité d'une culture à capter la lumière pour concurrencer la croissance des adventices, dès leur début de cycle cultural. La culture pourra couvrir rapidement le sol après le semis (vigueur en début de cycle) puis tout au long du cycle. Le pouvoir couvrant est une propriété à améliorer, qui a déjà été valorisée partiellement, notamment pour certaines céréales à paille (en agriculture biologique, par exemple).

Ce besoin d'amélioration peut être aussi considéré pour le pouvoir concurrentiel des cultures, plus global : en plus de la compétition pour la lumière, il fait intervenir des phénomènes de compétition dans le sol pour les éléments minéraux et l'eau et, dans certains cas, de l'allélopathie. Ce chapitre est essentiellement centré sur le cas particulier du pouvoir couvrant, autrement dit ce qui affecte l'architecture du couvert aérien et sa croissance dans le temps, l'allélopathie et la culture en association étant abordés plus loin.

Traits associés

Cette capacité de compétition est en lien étroit avec la vitesse de couverture du sol par les plantes, critère qui associe architecture des parties aériennes et vitesse de croissance (Andrew et al., 2015). Elle intègre également d'autres caractéristiques de la plante telles que la vitesse/le taux de germination et de levée, soit la vigueur précoce (Bertholdsson et al., 2005). Le pouvoir couvrant étant un critère intégratif, il inclut des traits plus simples tels que la surface foliaire, le port foliaire, la hauteur, ou encore la capacité de tallage herbacé pour les céréales. Il peut potentiellement être approximé par des cinétiques de NDVI à l'échelle du couvert en absence de stress biotiques et abiotiques (ex. dégâts de gel, sénescence).

Livre blanc

stress biotiques et abiotiques (ex. dégâts de gel, sénescence précoce liée à une maladie foliaire), permettant de construire une cinétique de développement de ce couvert. Il est en lien également, quelles que soient les espèces, avec la densité de semis ou de plantation et avec la qualité de la levée.

La germination et la levée des adventices peuvent aussi être affectées si les semences adventices sont à la surface du sol, comme dans les systèmes sans aucun travail du sol. Dans ce cas-là, un effet d'ombrage peut être observé. De plus, si le système racinaire de la culture se développe suffisamment vite et utilise l'eau disponible, alors les semences adventices manqueront d'eau pour germer et lever.

La réponse des plantes à l'ombrage (modification quantitative et qualitative du rayonnement) est aussi un élément déterminant dans leur capacité à concurrencer des adventices (Colbach *et al.*, 2019). Il existe quelques connaissances en particulier chez les graminées (réponse au rapport rouge clair/rouge sombre, à l'absence de bleu...) montrant des réponses très précoces des plantes à la présence de plantes voisines (travaux chez les graminées fourragères). Cependant des études plus approfondies restent nécessaires pour connaître l'ampleur de ces réponses en fonction de l'environnement lumineux ainsi que leur variabilité génétique et leur déterminisme sous-jacent.

Connaissance de la diversité génétique

La diversité génétique de ce critère intégratif est assez importante au sein d'une espèce (au moins en blé tendre) et entre espèces de céréales à paille, mais encore peu exploitée et très peu sélectionnée. Des projets de recherche et des essais variétaux ont permis d'identifier des variétés caractérisées par un pouvoir couvrant plus ou moins développé à différents stades de développement du blé tendre : épi 1cm, 2 nœuds, épiaison, floraison, (Massot *et al.*, 2018). Cependant, actuellement aucune variété ne combine un pouvoir couvrant élevé durant tout son cycle de développement. Le réseau EXPEBIO, qui fédère les essais variétaux de céréales à paille menés en agriculture biologique, présente chaque année les données disponibles de couverture du sol et de hauteur (composantes du pouvoir couvrant) en blé tendre. Par ailleurs, il est possible de poser l'hypothèse que les traits affectant le pouvoir couvrant (précocité, vigueur au démarrage, hauteur, port foliaire, surface foliaire, capacité de tallage...) peuvent être partiellement indépendants, ouvrant la voie à une sélection de nouvelles combinaisons de traits.

Connaissance du déterminisme génétique

Le pouvoir couvrant étant un trait intégratif, il semble plus pertinent de rechercher le déterminisme génétique des traits spécifiques le constituant. Actuellement, à

notre connaissance, il n'y a pas de travaux visant à identifier de gènes ni même de QTL liés au pouvoir couvrant et donc de références ayant identifié des QTL associés à cette capacité. Par ailleurs, il est possible que deux variétés présentent une capacité similaire de concurrence aux adventices du fait de combinaisons de traits différents (ex. capacité de tallage élevée + petites feuilles + port semi-érigé vs capacité de tallage faible + feuilles larges + port très étalé voire retombant).

Pratiques agronomiques associées

La date et le mode de semis, sa densité, ainsi que l'écartement entre les rangs constituent des pratiques à adapter localement, à combiner au pouvoir couvrant de la culture, qu'il soit recherché pour le rang simplement (en cas de binage de l'inter-rang) ou pour l'ensemble de la parcelle. En semis de printemps, le recours à des engrais dits *starter* au moment du semis et/ou à l'irrigation d'appoint sont aussi parfois nécessaires. Notons que cette nécessité d'irriguer à l'implantation devient aussi réelle pour certaines espèces sensibles semées à l'automne comme le colza, pour favoriser la vigueur au démarrage.



Expérimentation de compétition entre couverts végétaux pour la gestion des adventices

Acquisition / Méthodologie / Dispositif

Le pouvoir couvrant peut être estimé indirectement par des proxys, issus de mesures dynamiques effectuées à l'aide de capteurs comme le taux de couverture du sol, l'indice foliaire ou le NDVI. Des références ont notamment été acquises sur le colza et le blé, portant sur la caractérisation et la sélection de variétés plus compétitives vis-à-vis des adventices, en particulier pour l'agriculture biologique (pour le colza : Rapsodyn ; pour le blé tendre : FSOV 2006 B, FSOV 2012 N, FSOV 2020 Q).

Combinables à

Pratiques d'implantation appropriées (date, densité de semis, écartement, voire engrais starter et irrigation d'appoint notamment pour les semis de printemps).

Le pouvoir couvrant se traduit en général par des cultures moins longtemps appétentes ou sensibles vis-à-vis de certains ravageurs (appétence des feuilles).

A priori le pouvoir couvrant n'est pas antagoniste de la pratique de semis tardifs d'automne. Si un semis plus tardif en automne peut se traduire par une vitesse de croissance ralentie (action de la température plus fraîche, en tendance), ce point pourrait être compensé par l'utilisation de variétés à fort pouvoir couvrant. Par ailleurs, dans le cas des céréales, la vitesse d'émission des feuilles et donc des talles est plus rapide en semis tardif, ce qui peut constituer un levier de compensation.

La combinaison d'un semis tardif (pratique agronomique) et d'un fort pouvoir couvrant (dépendant de la génétique), outre la réduction des adventices, offrirait aussi, sans doute, une moindre pénalité de rendement. En effet, grâce au maintien d'une croissance suffisante avec un cycle raccourci, l'espèce cultivée échapperait aux conditions plutôt défavorables de début de cycle.

Anatagoniste de

Le pouvoir couvrant se traduit généralement par une absorption d'azote précoce qui peut, pour certaines espèces, réduire l'efficacité de conversion de cet élément pour le rendement et la qualité.

L'aptitude au binage mécanique se trouve réduite avec des variétés à fort pouvoir couvrant. L'idéotype architectural doit nécessairement être défini en fonction de l'itinéraire technique retenu.

L'aptitude des variétés à l'association avec d'autres cultures peut pâtir d'un trop fort pouvoir couvrant car la concurrence recherchée vis-à-vis des adventices peut aussi concerner les plantes compagnes.

Portée de la stratégie

Chez les espèces fruitières et la vigne le pouvoir couvrant n'est pour l'heure pas pris en compte dans les activités d'évaluation et de sélection. Il fait indirectement partie de la sélection chez les espèces forestières où la sélection porte sur l'interaction, et il n'est pas considéré mais mériterait d'être chez les plantes aromatiques et à parfum.

4- Comportement de l'espèce cultivée vis-à-vis de l'apport azoté

Un apport en azote réduit, voire des carences temporaires en azote, peuvent être tolérés par certaines plantes et variétés cultivées et se traduire par des effets bénéfiques :

- l'efficacité de l'azote est maximisée tout en limitant les efflux vers le milieu (pertes par voie ammoniacale, émission de protoxyde d'azote dans l'atmosphère)
- la croissance d'adventices nitrophiles est réduite (Moreau D. *et al.*, 2014)

Cet objectif de réduction d'adventices nitrophiles est susceptible de mettre en jeu les modalités de sensibilité au stress azoté et de son intensité au cours du cycle. Par ailleurs, des premiers résultats (Perthame L., 2020) concluent que les courbes de dilution de l'azote et la détermination du statut azoté de la plante ne sont pas adaptées à des couverts cultures-adventices ou à des mélanges de culture, contrairement à des peuplements homogènes.

Pour de très nombreuses espèces, les références techniques sont majoritairement évaluées à l'optimum de fertilisation azotée. La relation entre production et doses d'azote est une courbe de réponse asymptotique qui tend vers un optimum. La dose optimale qui est estimée sur la base des courbes de réponse correspond à la dose minimale épandue permettant d'accéder au rendement maximal. Or les pertes de rendement en conditions de doses suboptimales ou minorées (de 25% par ex.) n'occasionnent parfois que des pertes de rendement marginales n'induisant pas de perte de profit. Certaines variétés de blé perdent très peu de rendement (1.5 q/ha) avec un apport azoté suboptimal et gagnent en efficacité : le besoin en azote par quintal devient 2.7 au lieu de 3 (Jeufroy M.-H. *et al.*, 2013).

Pour les céréales, la conduite de culture avec un apport suboptimal en azote permet donc une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) et donc, moins de pertes vers l'atmosphère, un moindre coût pour l'agriculteur, un développement moindre de certaines maladies (ex. rouille brune, septoriose chez le blé), une diminution du risque de verse physiologique, pour une perte de rendement parfois marginale.

Dans le cas des plantes pérennes fruitières et de la vigne, la réponse à la fertilisation azotée a été optimisée pour maximiser la vitesse d'entrée en production et la régularité de production. De fortes différences existent entre les premières années d'installation de la culture et la période de production. Elles dépendent du système de culture et notamment du niveau d'intensification souhaité : à titre d'exemple, la vitesse de mise à fruit varie de 1 à 3 ans selon le niveau de fertilisation pour une espèce

Livre blanc

comme le pêcher. Or, la fertilisation azotée favorise la sensibilité aux bioagresseurs notamment la tavelure et les pucerons chez le pommier, et l'oïdium et les pucerons chez le pêcher, leur contrôle dans une logique de réduction d'intrants requiert un réajustement des itinéraires de production.



Blé semé à l'automne dans un couvert de luzerne semée au printemps (projet MOBIDIV)

Traits associés

De manière générale, des variétés avec une bonne efficacité d'utilisation de l'azote seront recherchées. Ces variétés pourraient avoir un besoin moindre en azote ou être capables de subir des carences temporaires sans perte ou avec des réductions marginales de rendement. Les carences azotées affectent aussi la morphologie des plantes et donc leur compétition avec les adventices pour la lumière (Perthame *et al.*, 2020).

S'agissant des céréales, la capacité à subir des carences azotées temporaires est sans doute à mettre en relation avec la vitesse d'assimilation de l'azote dans la plante. Effectivement, les nitrates absorbés qui seraient stockés moins longtemps dans les vacuoles des bases de tiges, participeraient plus rapidement à la croissance.

Pour le faible besoin en azote, il conviendrait de rechercher des critères liés à l'efficacité de conversion. Les traits recherchés sont par conséquent multiples. Par exemple, les variétés à plus forte fertilité/épi (nombre de grains par épi plus élevé) sont plus efficaces, c'est-à-dire que le besoin en azote par quintal de blé produit est plus faible. Cela est probablement dû au coût en azote pour produire des grains supplémentaires (morphogénèse) qui serait plus faible que celui pour construire des organes tels que des tiges ou des épis (Jeuffroy M.-H. *et al.*, 2013).

Connaissance de la diversité génétique

Sur blé, cette diversité est forte à la fois sur le besoin en azote et sur les pertes de rendement en condition d'apport azoté suboptimal. De premières références acquises sur pommier vont aussi dans ce sens.

Connaissance du déterminisme génétique

De très nombreux QTL en lien notamment avec le statut azoté de la plante ont été identifiés sur certaines espèces (pour une revue récente voir Sandhu *et al.*, 2021).

Pratiques agronomiques associées

L'ajustement de la dose d'azote et de son fractionnement aux besoins réels peut être effectué par l'utilisation d'outils d'aide à la décision simulant en continu le statut nutritionnel de la culture. Si l'objectif est de réduire la croissance des adventices nitrophiles, le pilotage de la culture à un niveau d'alimentation suboptimal s'avère indispensable. En effet, le recours à des leviers agronomiques, tels que de l'azote apporté en complément par des légumineuses ou des apports organiques, pourrait être contreproductif car ils pourraient entraîner des excès temporaires d'azote.

De même, le recours aux légumineuses, aux apports organiques reste aussi à étudier dans ce cadre : la mise à disposition d'azote disponible dans le temps et dans l'espace pour les plantes cultivées et les adventices a-t-elle une incidence sur la croissance et les populations d'adventices ? Les techniques d'épandage de l'azote au plus proche des racines de la plante, notamment en dehors de l'inter-rang sont à investiguer pour évaluer leurs effets sur la gestion des adventices.

Acquisition / Méthodologie / Dispositif

Actuellement le référencement au champ de ces traits reste complexe et coûteux en temps, car nécessitant l'obtention de courbes de réponse à la dose d'azote et des mesures de biomasse, de teneur en azote de parties végétatives et de grains ou de fruits via des prélèvements. Des méthodes alternatives non destructives pourraient être testées, notamment la capacité d'estimer par proxy-détection des indicateurs clés du statut azoté du peuplement comme par exemple, l'évolution post-floraison de la teneur en chlorophylle ou de l'indice foliaire vert. Ces suivis pourraient être évalués sur des dispositifs expérimentaux mettant en jeu des gradients d'alimentation azotée contrastés.

Combinable à

Pouvoir couvrant, semis décalés.

Antagoniste de

La mise en œuvre de doses d'azote réduites pourrait engendrer le développement d'une nouvelle flore spécialisée composée d'espèces adaptées à des sols moins riches en azote. Ce risque est à appréhender avec les malherbologistes. Par exemple, la vulpie est très peu nitrophile et est actuellement rare en parcelles agricoles, mais les populations pourraient augmenter. Cependant les espèces peu nitrophiles sont également peu compétitives vis-à-vis de la culture. L'évaluation du degré relatif de nitrophilie des espèces cultivées et des adventices n'est pas facilement accessible mais mériterait d'être étudiée.

En outre, cette restriction d'azote pourrait également s'accompagner de modifications vis-à-vis de la concurrence pour la lumière, susceptible d'avoir un impact sur le développement des adventices.

Par ailleurs, il faudrait veiller à restituer suffisamment de résidus afin de garantir la teneur en azote et en matière organique des sols.

Il serait nécessaire d'utiliser des outils de pilotage de la fertilisation dès lors qu'il y a recours à des formes substituables aux engrais de synthèse (engrais verts, fumure organique).

Une conduite suboptimale en azote peut enfin avoir des effets négatifs sur la qualité du produit (notamment la teneur et la composition en protéines chez les céréales).

5- Décalage des semis d'automne

Selon les espèces, deux stratégies bien différentes de décalage de semis par rapport aux périodes optimales peuvent être développées pour réduire la pression des adventices :

Le recours à des semis plus tardifs (cas notamment des céréales à paille semées à l'automne)

Les adventices qui ont le plus de succès dans un type de culture donné lèvent durant la période optimale de semis de cette culture. Le fait de retarder la date de semis de la culture, permet de limiter les levées des graminées automnales dans les cultures céréalières en s'éloignant de leur période de levées préférentielle. Cette technique est d'autant plus efficace qu'elle est précédée de faux-semis permettant de détruire les levées antérieures en période préférentielle grâce à un travail du sol superficiel. Retarder la date de semis impose de disposer de variétés adaptées aux semis tardifs, c'est-à-dire sans incidence significative sur la baisse de rendement avec le cas échéant, une réduction de certaines charges opé-

rationnelles. En effet, en semis plus tardif, le risque de verse lié à certaines maladies et les besoins en azote par exemple, sont diminués.

Par ailleurs, bien que la longueur de la phase végétative soit le plus souvent corrélée positivement au rendement, certains systèmes de culture pourraient bénéficier de semis d'automne plus tardifs (évitement des maladies) en tirant partie du réchauffement climatique qui permet d'atteindre un temps thermique sur une durée plus courte.

Le recours à des semis plus précoces (cas du colza par exemple)

L'objectif rejoint ici celui lié au pouvoir couvrant : exercer le plus rapidement possible une concurrence vis-à-vis des adventices par une couverture rapide de la culture. Pour favoriser l'atteinte de cet objectif, la culture est parfois associée à une autre espèce afin d'obtenir une association davantage concurrentielle de la croissance des adventices.

Cette stratégie est particulièrement efficace chez les espèces fruitières où une plantation précoce permet une installation du système racinaire à un moment où la compétition est plus réduite. Elle est parfois compliquée à mettre en œuvre du fait du calendrier des arrachages en pépinières et des conditions climatiques hivernales.

5.1- Aptitude aux semis tardifs pour les céréales à pailles

Espèces et variétés d'automne

Cette possibilité de semer plus tard concerne toutes les céréales à paille d'hiver. Le changement climatique peut constituer ici une opportunité car le cumul thermique entre le semis et la récolte a gagné 200°C environ en 20 ans, ce qui permet de semer plus tard sans trop réduire la durée du cycle.

Les agriculteurs ont d'ores et déjà modifié leurs pratiques de semis en particulier sur le blé d'hiver.

Sur les orges, espèce la plus précoce des céréales d'hiver, les pratiques ont néanmoins peu changé. Et paradoxalement, les semis tardifs d'orges semées à l'automne se sont concentrés sur les orges de printemps, car ces derniers permettent d'augmenter et de stabiliser le rendement et la qualité, tout en mettant à disposition sur le marché des lots de qualités supérieures à ceux des orges d'hiver. Or, pour le sélectionneur, il est sans doute plus aisé et approprié de développer ce type de pratiques, c'est-à-dire un décalage de semis de 15 à 20 jours, avec les orges d'hiver compte tenu de leur phénologie, de leur tolérance au froid, de leur résistance aux maladies y inclus les viroses et de limiter les risques de verse. En ef-

Livre blanc

fet, pour les orges de printemps, il convient d'améliorer significativement la tolérance au froid ainsi que la sensibilité à certaines maladies dont le développement est favorisé en semis d'automne. Par ailleurs, il serait très profitable d'envisager ce type de stratégie de semis tardifs pour les variétés fourragères d'hiver qui sont présentes sur de bien plus grandes surfaces et qui sont confrontées aux mêmes problématiques.

Traits associés

Aptitude des variétés à être semées plus tard : la performance moyenne et les variations de rendement et de qualité observées sur les variétés en semis tardifs (15 jours à 1 mois), ne sont pas ou peu affectées.

Derrière cette aptitude globale, des traits unitaires sont à rechercher :

- une phénologie adaptée et compatible avec le maintien d'une durée de cycle suffisante, un calendrier des stades et des phases de développement permettant d'éviter ou d'échapper aux principaux stress biotiques et abiotiques. Ce point intègre les phases précoces du cycle avec une capacité à germer et à lever dans des situations plus contraignantes et plus variées (sécheresse, froid, hydromorphie...).

- une compensation de la réduction de durée du cycle végétatif par une morphogenèse adaptée (fertilité des épis, taille et poids des grains accrus). Rappelons que les variétés qui produisent un grand nombre de grains par épi sont plus efficaces vis-à-vis de l'azote.

- une capacité à émettre des feuilles plus rapidement (phyllochrone ou phyllotherme plus court). Ce trait est en lien avec la possibilité d'échapper à certaines maladies foliaires (cas de la septoriose, par exemple)

- une meilleure tolérance au froid, car le risque de dégâts dus au froid en cas de gel précoce est accru en semis plus tardifs, à cause d'un durcissement nul ou trop faible des plantules.

Connaissance de la diversité génétique

La vitesse d'émission des feuilles est dépendante de la variété (Abichou M. *et al.*, 2019). Cette diversité est encore peu explorée et non exploitée.

Pratiques agronomiques associées

Semis retardé de 15 jours à un mois, en fonction du pédoclimat (caractère océanique/continental et niveaux de stress abiotiques de fin de cycle).

Par ailleurs, il faut considérer les dates des faux semis et le dernier travail du sol en pré-semis. Le dernier travail du sol proche du semis et réalisé en conditions humides,

s'il y a présence de semences adventices imbibées, risque de déclencher des vagues de levée d'adventices en culture. De la même manière, si le faux semis ne se fait pas en conditions humides, il ne peut pas être efficace.

Réglage de la densité de semis dont l'augmentation est à moduler en fonction de la région et du type de sol, pour obtenir un tallage non limitant.

Acquisition / Méthodologie / Dispositif

Dispositif avec des semis décalés, caractérisation de la phénologie, des composantes de rendement (contribution relative au rendement), de la vitesse de sortie des feuilles.

Combinable à

Le recours à des semis plus tardifs n'est pas antagoniste de la couverture des sols car cette pratique peut être combinée à des cultures intermédiaires ayant des durées de croissance plus longues.

L'aptitude au semis tardif a l'avantage d'avoir des effets positifs sur d'autres cibles, par exemple chez les céréales : réduction du risque de maladies transmises par les pucerons notamment les viroses, du piétin-verse, du piétin-échaudage et réduction de la verse. Cette baisse de l'incidence des maladies peut aussi être due à une baisse de l'inoculum primaire ou à un évitement en fin de cycle.

Un semis tardif est souvent caractérisé par moins de végétation précoce et une absorption d'azote plus tardive, ce qui, accompagné par des températures plus élevées en fin de cycle, se manifeste par un accroissement de la teneur en azote dans les grains. La baisse des besoins en azote et donc des doses d'engrais n'aura donc que peu d'impact sur la teneur en protéines des grains.

Antagoniste de

La qualité de l'implantation : le nombre de jours disponibles pour travailler le sol et pour semer est réduit et associé à des risques accrus de problèmes de germination et de levée et peut-être d'hydromorphie.

Les créneaux de désherbage mécanique à l'automne sont moindres.

Le transfert de l'azote des autres parties aériennes aux grains : le risque d'échaudage durant la fin de cycle des céréales à paille est accru. Des variétés caractérisées par une finition plus rapide seront souhaitables pour maintenir la qualité de la récolte.

Espèces et variétés de printemps

Dans certains cas extrêmes, des espèces de printemps peuvent être semées à l'automne. Cette pratique s'est largement développée sur l'orge de printemps depuis quelques années, d'abord en région centre (50% des surfaces actuellement), jusqu'en Bourgogne. De manière générale, une avancée des dates de semis pour la plupart des cultures semées au printemps est observée avec le changement climatique. Outre la limitation des adventices, cette pratique a plusieurs avantages : un rendement accru, une stabilisation de la teneur en protéines et une réduction des attaques précoces de pucerons d'automne. Dans le cas des orges de printemps, la date de semis est plus tardive qu'un semis d'automne d'orge d'hiver : ce décalage permet d'esquiver la période principale de levée automnale des graminées.

Traits associés spécifiques

En plus des traits mentionnés plus haut, l'amélioration de la tolérance au froid ainsi qu'à certaines maladies fongiques qui se développent en semis d'automne sont à rechercher.

NB : Les autres rubriques sont identiques à celles des espèces d'automne semées plus tardivement.

5.2- Aptitude à des semis plus précoces (colza)

La croissance précoce du colza est très concurrentielle de la croissance des adventices. Cette concurrence est amplifiée par le fait que le colza est de plus en plus associé à d'autres espèces, notamment des légumineuses.

Le développement rapide constitue aussi un moyen de réduire les attaques de ravageurs sur des cultures jeunes, plus vulnérables.

Traits associés

- Cf pouvoir couvrant.
- Germination et implantation en conditions variables, en particulier sous déficit hydrique.
- Efficience de la remobilisation de l'azote.

Pratiques agronomiques associées ; Acquisition / Méthodologie / Dispositif ; Combinable à ; Antagoniste de

Cf. pouvoir couvrant



© Arvalis

6- Intérêt des espèces de printemps dans la gestion des adventices

D'une manière générale, une introduction plus importante des espèces de printemps dans les rotations en France est souhaitable : alterner plus fréquemment les successions culturales avec les espèces d'hiver constitue le premier levier agronomique pour réduire les populations d'adventices et éviter l'invasion de flores spécialisées difficiles à maîtriser impliquant le recours intensif de solutions chimiques. Une alternance hiver-printemps peut déjà fortement réduire le stock de graines d'espèces adventices à durée de vie faible dans le sol (ex. les bromes). Les alternances de dates de semis pour des cultures dont le cycle est long permettent d'induire l'émergence d'espèces adventices moins adaptées à la culture en place pour lesquelles la production de graines ne sera pas réalisée (ex. espèces émergeant en fin printemps telles que *Amaranthus* ou *Solanum* en blé tendre d'hiver).

Pour atteindre cet objectif de diversification, il convient d'améliorer la performance des espèces de printemps sur un ensemble de critères et de combiner leur introduction avec d'autres pratiques.

Pour certaines espèces de printemps le rendement peut être amélioré et la consommation d'engrais réduite, ce qui contribue à l'attractivité globale du système choisi. Ces espèces de printemps peuvent être précédées d'un couvert à base de légumineuses, semé à l'automne, avec une durée de croissance suffisante pour apporter des bénéfices à la culture qui suit.

- Sur orge de printemps, les gains sont parfois spectaculaires et stables. En Champagne crayeuse, le rendement augmente et les apports d'engrais diminuent (Cabeza-Orcel P., 2020). Par ailleurs, les semis de printemps comparativement aux semis d'automne présentent des atouts : plus faibles consommations d'intrants et aptitude à enrichir davantage les grains en protéines (effet

fractionnement naturel, températures plus élevées au cours du remplissage activant le métabolisme azoté).

- Sur maïs, une légumineuse comme la luzerne peut fournir entre 40 et 140 kg d'azote par hectare. Pour le sélectionneur, il s'agit donc de réduire cette variabilité avec des variétés mieux adaptées et pour l'agronome, il devient nécessaire de mettre à disposition des outils prédictifs afin que l'agriculteur puisse prendre les bonnes décisions.

Le pois protéagineux constitue également une culture de diversification très utile pour lutter contre des adventices graminées automnales comme le vulpin. A l'échelle de la rotation, l'effet sur les cultures à venir en termes d'infestation adventices est très positif. De tels effets imposent d'évaluer les espèces/variétés avec une lecture pluriannuelle, au moins d'identifier des critères mesurables à l'échelle annuelle reflétant cette capacité de contrôle pluriannuel des adventices. Néanmoins, l'introduction du pois reste actuellement freinée par sa faible attractivité économique, due à des performances agronomiques limitées et très variables.

Le tournesol et le soja, semés plus tardivement encore, constituent des opportunités permises par le changement climatique et la sélection accrue de variétés précoces à très précoces, adaptées aux zones septentrionales. Cultures à larges écartement, elles peuvent être binées et de plus, elles ne nécessitent pas ou peu de protection insecticide ou fongique. Le soja ne nécessite pas systématiquement de l'irrigation en sol profond dans la partie Nord de la France.

D'autres espèces, encore peu présentes dans les rotations (comme le sarrasin, le lin, la cameline...) sont à explorer pour limiter la croissance des adventices, tout en offrant une possibilité de diversification. Cependant, en cas d'infestation d'adventices pouvant lever tout au long de la campagne (ray-grass notamment), il est essentiel d'envisager des cultures de diversification offrant des possibilités de lutte efficace, mécaniques et/ou avec une gamme d'herbicides adaptés.



© INRAE

Par ailleurs, certaines espèces comme le blé tendre ou le blé dur de printemps ont été largement délaissées par les sélectionneurs et les agriculteurs. Ces cultures sont devenues inexistantes dans le paysage français pour laisser place aux semis d'automne. Or de telles espèces auraient toute leur place, dans les systèmes agroécologiques diversifiés. En effet si les semis d'automne sont plus tardifs, les blés d'hiver pourraient être incorporés dans une rotation. Cette nouvelle orientation pourrait en particulier raviver l'intérêt des blés hybrides en semis de printemps. En effet, ces derniers auraient un bon potentiel de rendement ainsi qu'une meilleure stabilité de comportement en fin de cycle que les variétés conventionnelles. Cependant il faudrait veiller à ce que les espèces d'automne et de printemps qui se suivent soient bien différentes pour que la rotation conserve aussi son intérêt vis-à-vis des pathogènes.

Dans la pratique, pour l'ensemble des espèces de printemps cultivées, une avancée significative des dates de semis est observée, autorisée par le réchauffement climatique. L'augmentation de l'offre thermique consécutive à l'élévation des températures a effectivement permis aux agriculteurs :

- de semer plus tôt des variétés à durée de cycle plus longue, plus productives, tout en conservant un même calendrier des stades de développement,
- de semer des variétés précoces à des dates de semis normales ou légèrement plus tardives, ce qui permet d'échapper aux stress de fin de cycle, de réduire les besoins en irrigation, ainsi que les coûts de séchage.

Dans le futur, le maintien d'une production élevée et stable pour des espèces comme le maïs et le tournesol, ne pourra être réalisé qu'en avançant de manière importante les dates de semis début mars, voire fin février. En effet, ces espèces ont une durée de cycle température-dépendante, ce qui signifie que sans modification de pratiques de semis, le raccourcissement de la durée du cycle deviendra incompatible avec l'obtention de rendements suffisants. Garantir une durée de cycle non limitante tout en évitant les stress abiotiques sévères de fin de cycle (sécheresse, canicule) ne pourra être obtenu qu'en avançant considérablement les dates de semis. Mais cette stratégie impose d'améliorer en premier lieu la tolérance au froid et l'aptitude des futures plantes à produire de la biomasse en températures fraîches.

Traits associés

De manière générale, la tolérance au froid des variétés doit être améliorée.

- Aptitude à produire de la biomasse avec des températures qui sont actuellement suboptimales. Recherche de variétés dont la photosynthèse reste optimale sur une large gamme de températures, notamment à basses températures, environnement peu travaillé par les chercheurs.

- Aptitude à être moins sensible au froid à des stades de développement précoces et particulièrement lors de la transition florale. Le froid peut effectivement conduire à l'avortement de l'épi primaire, voire secondaire et dans les cas les plus extrêmes à des plantes sans épi.

- La date de floraison doit être adaptée au cycle de culture.

- La liaison entre la durée du cycle et le rendement devrait être rompue pour améliorer l'indice de récolte.

Pour augmenter le potentiel de rendement, la sélection a concentré ses efforts sur les groupes de précocité, avec de ce fait, un lien étroit entre le nombre total de feuilles émises, la durée du cycle (ou la capacité à capter l'énergie lumineuse) et le rendement. Contrairement à d'autres espèces de grandes cultures comme le blé, l'amélioration de l'indice de récolte, soit le ratio entre le rendement obtenu et la biomasse végétative produite, n'a été que peu travaillé. Or parmi les variétés récentes, certaines procurent des gains de rendement pour un même groupe de précocité, avec des épis plus fertiles et des grains plus lourds. Une telle sélection permettrait aussi de mettre à disposition des variétés sans doute moins consommatrices en eau : un bon rendement avec un nombre de feuilles moindre nécessite une meilleure efficacité de conversion de la biomasse végétative produite en grains.

Pour l'ensemble des espèces, afin d'introduire plus de rotations dans les systèmes de culture, il sera peut-être nécessaire de semer quelques variétés plus tôt qu'actuellement. Or semer plus tôt pourrait amplifier le risque d'enherbement. Il sera par conséquent nécessaire d'associer à ces pratiques, l'utilisation de variétés à fort pouvoir couvrant, c'est-à-dire :

- aptes au binage,
- aptes au semis sous mulch (capacité à lever sous mulch) et
- adaptées à la pratique du relay cropping (notamment, capacité à croître sous concurrence lumineuse, hydrique et nutritionnelle).

Le développement de couverts permanents est une pratique qu'il convient d'envisager, ainsi que la culture de nouvelles espèces résilientes, pour des marchés nouveaux. Ces nouvelles espèces devraient être prises en compte par les sélectionneurs et les agronomes.

Pratiques agronomiques associées

- Semis sous mulch,
- Semis sous couvert (couvert permanent, relay cropping),
- Désherbinage...
- Amélioration de l'accès à l'eau (création de ressources, recyclage), de l'efficacité d'utilisation en eau,

Livre blanc

Soulignons que la pratique de culture sous mulch est aussi en émergence chez les fruitiers et chez les maraichers, sous réserve de ne pas avoir de risques de ravageurs, type campagnols, dont l'impact devient très important.

Acquisition / Méthodologie / Dispositif

- Courbes de réponse de la photosynthèse à la température, identification de marqueurs spécifiques,
- Expérimentations soit avec des semis échelonnés, soit en zone d'altitude, pour évaluer la tolérance au froid,
- Variabilité des composantes de rendement par gamme de précocité,
- Suivi de l'indice foliaire vert par capteurs de proxy-détection dans des gammes d'environnement ciblés.

Combinable à

Tous les traits et pratiques complémentaires afin de gérer l'enherbement : désherbinage, semis sous mulch, semis sous couvert, relay cropping.

Antagoniste de

En plus d'occasionner des levées d'adventices plus nombreuses, les semis plus précoces ont tendance aujourd'hui à augmenter les risques liés aux ravageurs du sol comme les nématodes, les taupins, et aux insectes ailés comme les oscarines.

7- Blès et autres céréales pérennes

La sélection et le déploiement d'espèces et de variétés pérennes, notamment de céréales productives plusieurs années consécutives, est une piste à explorer pour la diversification des systèmes de culture et le développement de cultures moins dépendantes des intrants de synthèse, exogènes aux agrosystèmes. Elle est prometteuse car elle permettrait une valorisation multiple de la production : alimentation humaine (grains), alimentation animale (grains/fourrages), bio-énergie (biomasse), tout en tirant bénéfice d'un couvert pluriannuel pour la fourniture de services écosystémiques majeurs. Les céréales pérennes sont étudiées en France, notamment le blé pérenne Kernza® *Thinopyrum intermedium*, ainsi que d'autres génotypes de blés et seigles pérennes, testés par l'ISARA, l'unité GDEC et Arvalis (Duchene O. *et al*, 2019). Cette voie pourrait être intéressante pour la gestion des adventices.

A l'instar d'un couvert permanent, bien installé et couvrant, un tel « tapis » pourrait fortement limiter le développement des adventices. Le blé pérenne a une teneur en gluten autorisant sa panification d'après les exploitants de la marque (<https://kernza.org>). Ces espèces de céréales pérennes sont aussi recherchées pour leurs réservoirs de gènes de tolérance à des maladies.



© INRAE

8- Aptitude au contrôle mécanique de l'équilibre culture/couvert/adventices

Des traits pourront être sélectionnés chez les cultures de rente ou de couvert pour faciliter le contrôle mécanique des adventices (broyage, hersage...).

Le binage mécanique constitue une alternative à la lutte chimique. Le binage mécanique reste le moyen de gérer l'enherbement des rangs le plus utilisé chez les espèces fruitières et la vigne. Il requiert des agro-équipements spécifiques, parfois de nombreux passages pour obtenir des résultats satisfaisants et peut être contraint pour des raisons de portance des sols : en effet le nombre de jours d'accessibilité des terrains au binage est variable. Pour faciliter le passage des équipements, les traits suivants devraient être étudiés et améliorés :

- Port érigé des feuilles et des tiges : la recherche d'un port érigé chez l'espèce de rente qui facilite le binage mécanique, est sans doute antagoniste à un pouvoir couvrant augmenté. Les deux demandes existent en agriculture biologique, mais sont effectivement associées à des stratégies distinctes de gestion de la flore adventice à l'échelle de l'itinéraire technique.

- Bon ancrage racinaire : les espèces et variétés seraient ainsi moins sensibles au binage. Ce trait est à prendre en compte en particulier dans la sélection des porte-greffes pour les espèces fruitières et la vigne, avec de plus, la gestion du drageonnement qui résulte du fait de toucher les racines sur des porte-greffes de type pruniers ou pommiers.

- Aptitude aux semis plus profond. Cette aptitude est liée à la vitesse de poussée du coléoptile et à sa longueur. Les réserves contenues dans la graine et la taille de l'embryon doivent être suffisantes pour la levée et la levée suffisamment rapide pour ne pas donner avantage aux adventices. Ce n'est pas un problème pour les espèces à grosses graines, mais cela peut être un handicap pour les espèces à petites graines, selon le type de sol. Au-delà des grandes cultures, il s'agit aussi d'un nouveau trait à intégrer dans la sélection des porte-greffes avec la gestion du drageonnement. Notons que l'aptitude au semis profond est aussi à rechercher en conditions sèches. L'étendue des variations de ce trait est à étudier pour envisager son amélioration et peut nécessiter une adaptation de la densité de peuplement. Attention cependant aux retards de levée de la culture qui peuvent donner un avantage aux adventices.

- Aptitude au semis avec des écartements plus larges. Ce critère est à explorer pour le binage des espèces à écartements réduits, notamment toutes les céréales à paille. Les premières références démontrent que les pertes de rendement dues à l'écartement des semis sont liées aux

potentialités des milieux. Les pertes de rendement sont plus faibles en situations à faible potentiel, telle que des sols superficiels par exemple. Les semis en quinconce pour limiter les pénalités avec une meilleure répartition des ressources pourraient aussi être explorés dans le but de proposer le meilleur compromis écartement-densité de semis et une possibilité de binage permettant de limiter les pertes de rendement. Ces aptitudes mériteraient également d'être explorée parmi les variétés d'une même espèce.

La mise en œuvre d'écartements plus larges ouvre des pistes pour concevoir des systèmes de culture audacieux en accueillant entre les rangs de nouvelles espèces, dont certaines à haute valeur ajoutée (légumineuses, plantes de maraîchage...) et faciliter le binage. Cette pratique inclus le relay cropping, par exemple un semis de soja alterné au blé ou à l'orge. Les espèces cultivées entre les rangs pourraient également être composées de plantes répulsives (vis-à-vis des pucerons, des bruches par exemple,) ou attractives (abeilles, auxiliaires). Dans le prolongement, le concept d'agro-prairie pourrait trouver sa place dans la mise en œuvre d'écartement plus large, pour favoriser une tolérance accrue aux inondations et une meilleure stabilité du terrain (portance notamment).

En plus de la bineuse, deux autres outils de désherbage mécanique sont fréquemment utilisés pour le contrôle des adventices en grande cultures. Il s'agit de la herse étrille et de la houe rotative. Au contraire de la bineuse qui travaille spécifiquement sur l'inter-rang, ces 2 outils travaillent très superficiellement toute la surface de la parcelle et permettent ainsi de supprimer une part significative des très jeunes adventices encore mal enracinées quand les conditions pédologiques et météorologiques sont favorables (sol sec requis par exemple). Ces 2 outils pouvant affecter autant la culture que les adventices, leur efficacité dépend largement du stade de développement de la culture et des adventices au moment du passage. Ainsi, si les adventices doivent être travaillées avant le stade deux feuilles, le passage des 2 outils n'est possible sur une culture qu'en période de pré-levée ou après que la culture soit suffisamment enracinée pour limiter les pertes de pieds et avant un stade de développement au-delà duquel ces outils risquent d'occasionner des dégâts trop importants sur les feuilles et les tiges. Ces périodes de passage après la levée dépendent de la culture.

Par exemple, en blé, le passage de ces outils est possible entre 3 feuilles et mi-tallage, en colza, il est possible jusqu'à 4 à 6 feuilles et sur soja entre 1 feuille unifoliée et 1 feuille trifoliée (source Arvalis-Terres Inovia). Si les références techniques pour le désherbage mécanique sont adaptées aux espèces, elles ne sont pas adaptées aux variétés. Il n'existe pas aujourd'hui d'information sur l'aptitude des variétés au désherbage mécanique par herse étrille ou houe rotative. Toutefois, l'efficacité de la herse étrille et de la houe rotative étant fortement liée à

Livre blanc

la possibilité de passer avec ces outils à des stades très précoces du développement des adventices, nous pourrions rechercher des variétés présentant :

- une bonne adaptation aux semis profonds laissant plus de temps pour le passage des outils en pré-levée et favorisant l'ancrage des variétés dans le sol,
- un bon ancrage racinaire précoce qui limiterait les pertes de pied lors du passage des outils,
- une plus grande précocité et vigueur en début de cycle pour un passage plus précoce des outils au cours de l'année au moment où les adventices sont encore peu développées,
- le port de la plante et des feuilles est aussi probablement un élément à prendre en compte.

Par exemple, des plantes de port planophile couvrant rapidement le sol pourraient limiter la période de passage possible pour les outils, un passage trop tardif pouvant occasionner des dégâts trop importants sur la culture. Toutefois, ces ports planophiles sont aussi souvent plus compétitifs vis-à-vis des adventices. Privilégier cette couverture rapide du sol et cette compétition accrue vis-à-vis des adventices au passage d'outils de désherbages mécaniques dont l'efficacité dépend des conditions de l'année peut s'avérer être une stratégie gagnante.

Connaissance de la diversité génétique

Il existe une variabilité génétique chez les céréales à paille, c'est-à-dire des génotypes présentant des ports érigés à retombants à différents stades phénologiques.

Traits associés

- Architecture
- Morphogénèse
- ...

8.1- Aptitude à être cultivée en peuplement dense et/ou écartement étroit

Une couverture précoce des sols peut être une solution pour contrôler la flore adventice (voir 3 Pouvoir concurrentiel, en particulier pouvoir couvrant). Cet objectif est en lien avec une aptitude des plantes à être cultivées en peuplement dense et/ou en écartement étroit.

Traits associés

- Une architecture optimisée pour la compétition précoce, sachant que des simulations () montrent que l'architecture optimale pour la compétition pour la lumière avec les adventices n'est pas la même que celle pour la compétition avec des plantes de la même espèce
- Une résilience aux maladies
- Une résistance à la verse

8.2- Aptitude à lever sous mulch

La présence d'un mulch ou de paillage permet de réduire le développement des adventices en interculture (voir 11. Cultures sous couverts : «mulchs vivants») et constitue aussi un moyen de réduire l'évaporation des sols. C'est également une solution possible chez les pérennes, utilisée de longue date par les forestiers. Elle se développe en culture fruitière et légumière sous réserve de pouvoir contrôler la pression des ravageurs.

Peu de travaux des effets d'un mulch sur la levée existent. Les références concernent l'effet de la structure du sol sur la levée, montrant deux types d'effets : un effet barrière physique et un effet sur les conditions hydrothermiques du sol.

Plus généralement, la sécurisation de la levée d'espèces semées en période estivale (à la volée avant récolte, sous mulch en semis direct...) reste une voie importante d'amélioration et d'accès aux possibilités offertes par les couverts et cultures associées.

9- Allélopathie

Il s'agit de rechercher et d'étudier des variétés produisant elles-mêmes des substances ou composés allélochimiques capables d'inhiber de manière significative la germination et/ou la croissance de certaines adventices.

Cette aptitude n'a été que très peu étudiée en champ, mais assez largement en conditions contrôlées. Cependant les essais au champ se confrontent à plusieurs problèmes d'importance :

- distinguer la capacité allélopathique des variétés et des espèces de la capacité de compétition de ces mêmes variétés et espèces. Cela nécessite une bonne connaissance des métabolites spécialisés en jeu et de leur dégradation via les micro-organismes du sol,
- s'assurer que la capacité allélopathique d'une variété considérée n'affecte pas également les plantes de cette même variété.

Les travaux de sélection de matériel végétal induisant un important effet allélopathique vis-à-vis de certaines adventices sont rares, et les résultats très variables. En céréales à paille, le travail de Bertholdsson (2010) suggère une corrélation négative entre le potentiel allélopathique et le rendement de la variété, alors que ce n'est pas le cas chez le riz (Kong C. *et al.*, 2011).

Au-delà d'étudier le phénomène d'allélopathie, il pourrait être intéressant d'introduire ou de ré-introduire dans les rotations, des plantes reconnues pour leur capacité allélopathique, notamment l'avoine, le seigle, le sarrasin et la luzerne. Le tournesol est par ailleurs considéré comme l'une des plus importantes plantes allélopathiques (Jabran K. *et al.*, 2017).

Acquisition / Méthodologie / Dispositif

Conception de méthodes d'étude compatibles avec l'exploration d'un grand nombre d'entités génétiques, permettant un criblage fiable de la capacité allélopathique au champ.

10- Cas des associations d'espèces récoltées

Les associations céréales-légumineuses (pois, lentille, lupin) ou colza-légumineuses (pois, lentille, féverole) peuvent être plus compétitives que les espèces cultivées seules. Et dans ce cas, il est important de s'assurer que les deux cultures se développent bien ensemble.

Par la mise en œuvre de telles associations, les agriculteurs ont des objectifs multiples : la recherche d'une plus grande stabilité du rendement, d'économies d'azote, d'une gestion des adventices avec moins d'herbicides, de production des céréales contenant plus de protéines ou de cultures de pois, de colza... ayant moins de problèmes agronomiques (adventices, ravageurs, verse). A titre d'exemple, le blé peut jouer un rôle de tuteur pour la lentille. Les associations concernent aussi les fourrages et dans ce cas, c'est davantage des objectifs de meilleure résilience, de stabilité de la production et de qualité qui sont mis en avant. Pour les mêmes raisons ces associations, autrefois très répandues chez les espèces fruitières (association avec la vigne, avec les cultures maraichères...), ont été éliminées des systèmes intensifs et reviennent actuellement dans le cadre des approches en agroforesterie.

L'objectif de réduction des adventices peut être dû à une croissance précoce accélérée, grâce au pouvoir couvrant des espèces associées et parfois par des effets d'allélopathie exercée par certaines légumineuses.

Les références issues des associations avec des légumineuses montrent que les effets vont bien au-delà de ceux qui résultent de la concurrence entre espèces et de la fixation d'azote symbiotique. Les mécanismes liés au processus de facilitation plus ou moins réciproque peuvent être multiples et sont encore peu connus. Ils concernent sans doute, tant les organes aériens que souterrains : barrière physique, barrière physiologique vis-à-vis des bio-agresseurs, complémentarité fonctionnelle, dans le temps et dans l'espace, pour assurer une meilleure croissance, biodisponibilité des ressources... Comme vu précédemment, plutôt que de conseiller telle espèce ou telle variété, ne pourrait-on pas aussi conseiller, telle(s) combinaison(s) de traits en fonction de la situation et de l'objectif de production. Cette démarche plus générique implique néanmoins de phénotyper davantage car la connaissance des traits reste un préalable afin de trouver les espèces/variétés correspondant au conseil de combinaison(s) de traits.

11- Cultures sous couverts: «mulchs vivants»

Le développement des adventices peut être limité par la concurrence avec un couvert semé temporaire en inter-culture ou permanent simultanément à la culture de rente. Ces couverts ont aussi un rôle pour limiter l'érosion ainsi que les pertes d'azote dans l'eau, favoriser la biodiversité et/ou apporter de l'azote à la culture de rente. Des connaissances existent sur les espèces et variétés à utiliser pour les cultures intermédiaires : installation rapide, capacité d'utilisation de l'azote résiduel, éventuellement fixation de l'azote atmosphérique, éventuellement facile à détruire via le gel...

Cependant aujourd'hui un nouveau challenge s'impose avec la culture d'espèces de rente sous couverts, en particulier sous couverts permanents que nous avons choisi de développer. Plus d'informations peuvent être consultées dans les références suivantes : Bodoville G. (2020), Harwig N. & Ammon H. (2002), Hiltbrunner J. et al., (2007a, b), Vincent-Caboud L. et al. (2019).

Il s'agit de faire cohabiter différentes espèces au sein d'une parcelle en maintenant les services apportés par chacune d'elle : production de grains pour l'espèce de rente et contrôle des adventices, parfois fixation d'azote pour les espèces compagnes. Il est donc essentiel de bien comprendre les interactions entre ces espèces afin de définir quelles combinaisons de variétés entre espèces de rente et espèces du couvert pourront donner de bons résultats.

Différentes études tendent à montrer que pour maintenir plusieurs espèces au sein d'un écosystème, en plus des compatibilités entre elles (par exemple via l'acquisition des ressources différentes), la diversité génétique intraspécifique pouvait être déterminante en permettant une adaptation locale assez fine de chaque espèce (Meilhac J. *et al.*, 2019). Cependant peu de connaissances sont actuellement disponibles sur les gammes de variabilité optimales et sur les traits déterminants.

Une culture de rente sous couvert peut maintenir voire augmenter son rendement, toutefois de fortes variations sont observées qu'il conviendrait de mieux comprendre afin de les maîtriser (Carof M. *et al.*, 2007a). L'amélioration génétique du couvert doit permettre de faciliter la croissance de la culture sans la concurrencer. L'amélioration génétique de la culture de rente doit être orientée afin que la culture ne subisse pas de concurrence précoce et profite de la biodisponibilité en éléments nutritifs. La phénologie des espèces de couvert et de rente, c'est-à-dire la succession de leurs phases de développement et de croissance au cours de l'année, est un élément crucial pour le bon fonctionnement du mélange.

La réflexion sur les variétés à semer afin qu'elles cohabitent doit être conjointe pour l'ensemble des espèces : culture de rente et couvert. Les enjeux étant importants et les tests à réaliser étant pléthoriques, des modèles sont utilisés et devraient être développés afin de définir les associations pertinentes, puis d'identifier les progrès génétiques à réaliser (Jeuffroy M.-H. *et al.*, 2012 ; Memmah M. *et al.*, 2014 ; Martre P. *et al.*, 2015 ; Tao F. *et al.*, 2017).

11.1- Culture de rente

Une céréale en culture de rente peut être soumise très précocement à une compétition avec le couvert pour la lumière et pour l'azote (Carof M. *et al.*, 2007b). Il serait donc bénéfique de stimuler sa croissance et son absorption en phase précoce. En particulier, il s'agirait d'augmenter la densité de semis, resserrer les écartements entre les rangs et choisir des variétés à fort pouvoir couvrant. En cas d'entrée en carence azotée précoce, il serait judicieux d'apporter de l'azote plus tôt, afin de favoriser la croissance de la céréale et d'inhiber celle de la légumineuse du couvert permanent. Il convient de choisir une variété dont la phénologie est adaptée. Il a été observé en agriculture biologique que les variétés les plus stables sont souvent celles qui expriment des besoins en azote plus faibles, sachant que ce critère est souvent lié à une meilleure efficacité de conversion de l'azote absorbé en rendement ; cette piste serait donc aussi à explorer. En outre, comme il est impossible de toujours assurer une croissance optimale des deux espèces, l'aptitude à la compensation est un trait à rechercher et à valoriser. Par exemple, la baisse d'un peuplement en épis peut être compensée par la fertilité, c'est-à-dire par le nombre de grains/m² ou par le poids des grains.

Traits associés

- la densité de semis et les écartements entre les rangs
- le pouvoir couvrant des variétés
- le tallage qui doit rester faible et le port dressé afin de ne pas étouffer le couvert
- le besoin en azote et l'efficacité de conversion ou NUE
- la phénologie

Notons dans le cas du maïs, qu'une variété a été identifiée par les agriculteurs du sud de la France comme étant une des seules à valoriser les couverts. Cette variété est caractérisée par une très bonne vigueur au départ, puis un port étalé et une tige haute.

11.2- Couverts

Le choix des espèces et des variétés du couvert a un effet sur le contrôle des adventices (White J. & Scott T., 1991 ; Petit S. *et al.*, 2018) mais aussi sur la compétition avec la culture de rente (Bergkvist G., 2003). L'objectif est de semer un couvert compétitif vis-à-vis des

adventices mais non compétitif vis-à-vis de la culture de rente. Cela peut être obtenu par des morphologies et/ou des dynamiques de croissance différentes entre couvert et culture de rente. Les références acquises ont permis d'estimer la dynamique de croissance optimale du couvert en termes de biomasse à l'hectare et de contribuer au choix des couverts. Par exemple, avec des céréales à paille, le couvert doit croître mais ne pas dépasser 1 t/ha à la floraison du blé. Les trajectoires en cours de référencement peuvent donc constituer un premier guide pour identifier par milieu, les espèces et les variétés les mieux adaptées sachant que le choix et la sélection des variétés portent à la fois sur la culture de rente et le couvert.

Les espèces fourragères classiquement semées ou prairiales au sens large incluant de nouvelles espèces à tester constituent un bon départ pour construire des couverts pérennes (Hiltbrunner J. & Liedgens M., 2008). Cependant, la sélection a créé des variétés productives qui peuvent être trop compétitives par rapport à la culture de rente, telle que la luzerne dont la croissance doit être freinée lorsqu'elle est associée à une céréale ou d'autres légumineuses fourragères telles le trèfle, le sainfoin, le lotier... (Radicetti E. *et al.*, 2018 ; Ilnicki R. & Enache A., 1992 ; Baresel J., 2018). Il serait intéressant de cribler à nouveau les ressources génétiques de ces espèces avec comme objectif non pas la production de fourrage mais de services écosystémiques comme le contrôle des adventices et la fourniture d'azote.

La succession des espèces dans le temps au sein du couvert pérenne peut aussi être une option. Par exemple, il est possible d'associer une espèce dont l'implantation très rapide permettra de maîtriser les adventices mais qui a une durée de vie courte, avec une espèce plus lente à l'installation mais plus pérenne qui prendra le relais, par exemple, le fénugrec en association avec la luzerne ou le lotier.

Pour chaque espèce et chaque variété, il faut bien définir son rôle au sein de l'agro-écosystème afin de pouvoir définir des idéotypes (moyenne et variance pour un ensemble de traits) qui pourront être associés. Un panel de variétés bien caractérisées en particulier en termes de phénologie et de compétitivité pourra être valorisé pour la constitution de mélanges via des modèles de fonctionnement des couverts végétaux (Louarn G. *et al.*, 2015). Nous avons déjà mentionné que les diversités spécifique et génétique pouvaient permettre une stabilité de la culture mais l'importance et la cible de cette diversité doivent être encore mieux définies. Par exemple, pour une fonction donnée, faut-il plusieurs espèces et/ou plusieurs variétés ? La diversité doit être raisonnée afin d'être optimale pour les objectifs agronomiques.

Pratiques agronomiques associées

- semis sans travail du sol,
- contrôle du couvert (Thorsted M. *et al.*, 2006),



Couvert de sainfoin

En conclusion, concernant les cultures de rente sous couverts pérennes, le choix des variétés à semer doit être raisonné conjointement pour l'ensemble des espèces de l'agro-écosystème avec une vision sur plusieurs années, dans un contexte pédo-climatique donné et avec des objectifs de production donnés. A cela s'ajoute la possibilité de prendre en compte les micro-organismes du sol déjà présents ou ajoutés, dans une démarche de biocontrôle. Ce type d'agriculture, avec des intrants limités, renouvelle certains objectifs de sélection et ouvre la voie à l'utilisation de nouvelles espèces.

Traits associés

- Phénologie adaptée à la culture de rente
- Asynchronie de la croissance avec la culture de rente
- Compétitivité vis-à-vis des adventices

Antagonisme avec

- Compétitivité avec la culture de rente

12- Conclusion

Dès le début de l'agriculture au néolithique la maîtrise des adventices a été le principal souci des agriculteurs. De l'abattis-brûlis fort consommateur de surfaces au début de l'antiquité, jusqu'aux herbicides de synthèse sélectifs des cultures dans la deuxième moitié du 20^e siècle, chaque époque a développé ses solutions, toutes très consommatrices en main d'œuvre et/ou en travail du sol (Gasquez *et al.*, 2020). L'agronome Romain Columelle (d'après Du Bois, 1844) estimait à 42 jours le temps nécessaire à la conduite d'un hectare de blé de la préparation du sol à la récolte, dont une trentaine consacrés à l'élimination des adventices.

Réduire notre dépendance aux herbicides de synthèse est donc un immense défi à relever pour réussir la transition agroécologique. La gestion durable des adventices nécessite d'imaginer des solutions composites actionnant différents leviers (rotation, couverts, cultures compagnes, date, mode et densité de semis, désherbages mécaniques...) dont les effets toujours partiels et la faisabilité dépendent de l'environnement de culture, des caractéristiques et de l'organisation de l'exploitation. La génétique est un levier de premier ordre tant pour améliorer la compétitivité vis-à-vis des adventices (des cultures de rente, des couverts, des cultures compagnes ou de diversification) que pour permettre la mise en œuvre ou accroître l'efficacité de certaines pratiques. Les caractéristiques génétiques d'intérêt potentiel sont nombreuses avec des effets qui peuvent être additifs, synergiques mais aussi parfois antagonistes et souvent dépendants des environnements de culture et des pratiques des agriculteurs. Tous les traits évoqués dans ce document pour faciliter la gestion des adventices dans un contexte de réduction des intrants, en particulier des herbicides, ont des efficacités qui méritent d'être étudiées de manière approfondie, et ce au sein d'une diversité d'agro-écosystèmes existants et en développement. De plus la combinaison des fonctions visées est souhaitable compte tenu de l'efficacité partielle de chacun des traits. Revenir à des ressources génétiques présentant de la variabilité pour les traits évoqués si celle-ci n'existe pas dans les variétés élites, ainsi que développer et sélectionner des cultures et espèces nouvelles à introduire dans des rotations, des associations, des couverts devrait contribuer à la maîtrise de l'ensemble des espèces d'adventices dans les systèmes de culture.

La diversité des traits potentiellement utiles à la régulation des adventices pose la question de la hiérarchie entre les traits. Quels sont ceux qui doivent être travaillés prioritairement en sélection ? Hiérarchiser les traits selon leur capacité à réguler les adventices dans une diversité de situations culturales intégrant le recours à d'autres leviers techniques nécessite d'une part un travail conjoint entre agronomes et généticiens ainsi qu'une frontière plus perméable entre ces deux disciplines et d'autre part, le développement d'outils et méthodes permettant de tester et d'évaluer une diversité de stratégies de contrôle des adventices combinant leviers techniques et génétiques dans une diversité d'environnements de cultures.

Devant le travail considérable, quasiment irréalisable, du test de toutes les associations de fonctions recherchées et de toutes les combinaisons de traits sous-jacentes, pour une diversité d'espèces, de situations techniques et pédo-climatiques, il est évident qu'un travail de modélisation et de prédiction reste à accomplir pour aider les sélectionneurs à identifier les idéotypes les plus prometteurs (Gauffreteau A., 2018). Certains modèles récents prennent en compte le développement de la culture de rente et des adventices dans leurs prédictions, pour des

choix optimum (Colbach N. *et al.*, 2021 ; Bastiaans *et al.*, 1997). Il existe de plus des antagonismes pour les objectifs de sélection de certains traits qu'il est important d'évaluer via l'étude de leurs déterminants génétiques. Ce travail sera permis par l'amélioration constante des méthodes et des capacités de mesure des traits et des proxys, en regard des avancées technologiques dans les domaines concernés : mécanique, optique, gestion et interprétation de données massives. Cette définition d'idéotypes des cultures de rente et des couverts doit se faire en intégrant les avancées agronomiques. Les dispositifs d'évaluation des variétés sont aussi à faire évoluer, pour mieux prendre en compte la diversité des environnements de culture (diversité des pratiques, diminution des intrants, augmentation des aléas climatiques) et la diversité des espèces et cultivars dans la rotation.

L'objectif visé de maîtrise des adventices ne doit pas faire oublier le rapport entre le coût de l'investissement et l'impact obtenu qui doit autoriser des modes de production réalistes, en particulier le maintien d'un rendement et d'une qualité valorisable par les marchés des espèces de rente. Ainsi, la coopération scientifique centrale entre généticiens et agronomes doit-elle englober également d'autres disciplines (écophysiologie, écologie, biocontrôle pour ne citer qu'elles), mais aussi et surtout une co-innovation avec les agriculteurs, utilisateurs des variétés (cultures de rentes, couverts, plantes compagnes, cultures de diversification) et assembleurs des techniques de cultures qui conditionnent l'expression des fonctions agroécologiques attendues, portées potentiellement par les variétés utilisées. Etant donné l'extrême diversité des systèmes de production français - qui doit être préservée et développée car gage de résilience face aux aléas climatiques comme économiques -, les meilleures combinaisons génétiques/ techniques culturales pour la maîtrise agroécologique des adventices évoquées dans cet article, ne peuvent être énoncées a priori une année donnée sur tout le territoire, mais seront à activer au cas par cas par chaque agriculteur dans son propre système de production (agriculture biologique, de conservation des sols, sous cahier des charges filières, à haute valeur environnementale...), le contexte économique (marchés) et climatique de l'année, ses possibilités techniques (temps de travail, matériel et solutions de maîtrise des adventices disponibles). Il est donc primordial de présenter une très large palette de combinaisons techniques activables, parfois antagonistes, pour que l'agriculteur puisse choisir celles qui devraient fonctionner dans son cas chaque année.



Bibliographie

Abichou, M., de Solan, B. & Andrieu, B. (2019) Architectural Response of Wheat Cultivars to Row Spacing Reveals Altered Perception of Plant Density. *Front. Plant Sci.* 10:999. doi: 10.3389/fpls.2019.00999

Andrew, I. K. S., Storkey, J., & Sparkes, D. L. (2015). A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. *Weed research*, 55(3), 239-248.

Baresel, J., Nichols, P., Charrois, A. & Schmidhalter, U. (2018) Adaptation of ecotypes and cultivars of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) to German environmental conditions and its suitability as living mulch. *Genet Resour Crop Evol* 65:2057–2068. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0672-z>

Bastiaans, L., Kropff, M., Kempuchetty, N., Rajan, A. & Migo, T. (1997) Can simulation models help design rice cultivars that are more competitive against weeds? *Field Crops Research* 51, 101-111

Bergkvist, G. (2003) Influence of White Clover Traits on Biomass and Yield in Winter Wheat- or Winter Oilseed Rape-Clover Intercrops. *Biological Agriculture & Horticulture* 21:151–164. <https://doi.org/10.1080/01448765.2003.9755259>

Bertholdsson, N. O. (2005). Early vigour and allelopathy—two useful traits for enhanced barley and wheat competitiveness against weeds. *Weed Research*, 45(2), 94-102.

Bertholdsson, N. O. (2010). Breeding spring wheat for improved allelopathic potential. *Weed Research*, 50(1), 49-57.

Bodoville G. (2020) Semis sous couverture permanente vivante : le Graal bientôt à portée de main ? (dossier : agriculture biologique de conservation des sols). *Cultivar Leaders* 36–38

Cabeza-Orcel, P. (2020) Un couvert de légumineuses peut-il améliorer les performances des cultures ? *Perspectives Agricoles*, n°479, Juil.-Août 2020

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. *Agron Sustain Dev* 27:347–356. <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. *Agron Sustain Dev* 27:357–365. <https://doi.org/10.1051/agro:2007017>

Colbach, N., Gardarin, A. & Moreau D. (2019) The response of weed and crop species to shading: which parameters explain weed impacts on crop production? *Field Crops Research* 238:45-55, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008>

Colbach, N., Colas, F., Cordeau, S., Maillot, T., Queyrel, W., Villerd, J. & Moreau D. (2021) The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research* 261, 108006, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>

Duchene, O., Celette, F., Ryan, M., DeHaan, L., Crews, T. & David, C. (2019) Integrating multipurpose perennial grains crops in Western European farming systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 284, 106591. doi: [10.1016/j.agee.2019.106591](https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106591)

Gasquez, J., Dron, M. & Délos, M. (2020). Histoire du désherbage en grandes cultures. par, Académie d'Agriculture de France, *Phytoma* 736:44-52

Gauffreteau, A. (2018). Using ideotypes to support selection and recommendation of varieties. *OCL*, 25(6), D602

Hartwig, N. & Ammon, H. (2002) Cover Crops and Living Mulches. *Weed Science* 50:688–699

Hiltbrunner, J., Jeanneret, P., Liedgens, M., Stamp, P. & Streit, B. (2007a) Response of Weed Communities to Legume Living Mulches in Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 193:93–102. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00250.x>

Hiltbrunner, J., Liedgens, M., Bloch, L., Stamp, P. & Streit, B. (2007b) Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26:21–29. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.002>

Hiltbrunner, J. & Liedgens, M. (2008) Performance of Winter Wheat Varieties in White Clover Living Mulch. *Biological Agriculture & Horticulture* 26:85–101. <https://doi.org/10.1080/01448765.2008.9755071>

Ilnicki R. & Enache A. (1992) Subterranean clover living mulch: an alternative method of weed control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 40:249–264. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90096-T](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90096-T)

Jabran K. (2017) Sunflower allelopathy for weed control. In: K. Jabran, *Manipulation of Allelopathic Crops for Weed Control*. Springer Briefs in Plant Science, Springer International Publishing AG, Switzerland, pp. 77-85.

Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Machet, J.-M., & Recous, S. (2013) Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ? *Cah. Agric.* 22, 249-57. <https://doi.org/10.1684/agr.2013.0639>.

Jeuffroy, M.-H., Vocanson, A., Roger-Estrade, J. & Meynard J.-M. (2012) The use of models at field and farm levels for the ex ante assessment of new pea genotypes. *European Journal of Agronomy* 42, 68-78, [10.1016/j.eja.2012.04.005](https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.04.005)

Kong, C., Chen, X., Hu, F. & Zhang, S. (2011). Breeding of commercially acceptable allelopathic rice cultivars in China. *Pest management science*, 67(9), 1100-1106.

Louarn, G., Escobar Gutiérrez, A., Migault, V., Faverjon, L. & Combes, D. «Virtual grassland» : un modèle individu-centré pour simuler la dynamique des communautés prairiales en réponse à la disponibilité en eau en en N du sol. Colloque présentant les méthodes et résultats du projet Climagie (métaprogramme ACCAF), Nov 2015, Poitiers, France. 223 p. hal-01236562.

Martre, P., Quilot-Turion, B., Luquet, D., Memmah, M., Chenu, K. & Debaeke, P. (2015). *Model-assisted phenotyping and ideotype design*. London: Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd.

Massot, H., Le Campion, A., Rolland, B., Vidal, R., Sicard, H., & Fontaine, L. (2018). Guide de notation de la couverture du sol par le blé tendre. INRA, ITAB.

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. *Annals of Botany* 123:891–900. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy227>

Memmah, M., Quilot-Turion, B. & Rolland, A. (2014). Multicriteria sorting methods to select virtual peach ideotypes. *International Journal of Multicriteria Decision Making* 4, 348-366. doi: [10.1504/IJMCDM.2014.066874](https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2014.066874).

Moreau, D., Busset, H., Matejicek, A. & Munier-Jolain, N. (2014) The ecophysiological determinants of nitrophily in annual weed species. *Weed Research* 54:335-346, [10.1111/wre.12090](https://doi.org/10.1111/wre.12090).

Perthame L. (2020) Analyse et modélisation du rôle de la compétition pour l'azote dans la régulation des adventices. PhD Thesis, Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03134045>.

Petit, S., Cordeau, S., Chauvel, B., Bohan, D., Guillemin, J.-P. & Steinberg, C. (2018) Biodiversity-based options for arable weed management. A review. *Agron Sustain Dev* 38:48. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0525-3>

Radicetti E, Baresel JP, El-Haddoury EJ, Finckhd, M., Mancinellia, R., Schmidtd, J., Thami Alami, I., Udupac, S., van der Heijdenf, M., Wittwerf, R. & Campiglia E. (2018) Wheat performance with subclover living mulch in different agro-environmental conditions depends on crop management. *European Journal of Agronomy* 94:36–45. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.011>

Sandhu, N., Sethi, M., Kumar, A., Dang, D., Singh, J., & Chhuneja, P. (2021) Biochemical and Genetic Approaches Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Crops: A Review. *Front. Plant Sci.* 12:657629. doi: 10.3389/fpls.2021.657629.

Tao, F., Rötter, R., Palosuo, T., Díaz-Ambrón, C., Mínguez, M., Semeno, M., Kersebaum, K., Nendel, C., Cammarano, D., Hoffmann, H., Ewert, F., Dambreville, A., Martre, P., Rodríguez, L., Ruiz-Ramos, M., Gaiser, T., Höhn, J., Salo, T., Ferrise, R., Bind, i M. & Schulman A. (2017) Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *European Journal of Agronomy* 82, 144-162, 10.1016/j.eja.2016.10.012

Thorsted, M., Olesen, J. & Weiner, J. (2006) Mechanical control of clover improves nitrogen supply and growth of wheat in winter wheat/white clover intercropping. *European Journal of Agronomy* 24:149–155. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.07.004>

Vincent-Caboud, L., Casagrand, M., David, C., Ryan, M., Silva, E. & Peigne, J. (2019) Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. *Agron Sustain Dev* 39:45. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>

White, J., & Scott T. (1991) Effects of perennial forage-legume living mulches on no-till winter wheat and rye. *Field Crops Research* 28:135–148. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90079-B](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90079-B)



**Retrouvez plus d'informations
sur nos activités**

www.plantalliance.fr

[PlantAllianceFR](https://www.instagram.com/PlantAllianceFR)

Mylène Durand-Tardif
mylene.durand-tardif@inrae.fr
Maxime Szambien
maxime.szambien@inrae.fr

PlantAlliance
28 rue du Docteur Finlay
75 015 Paris
+33 (0)1 42 75 95 83