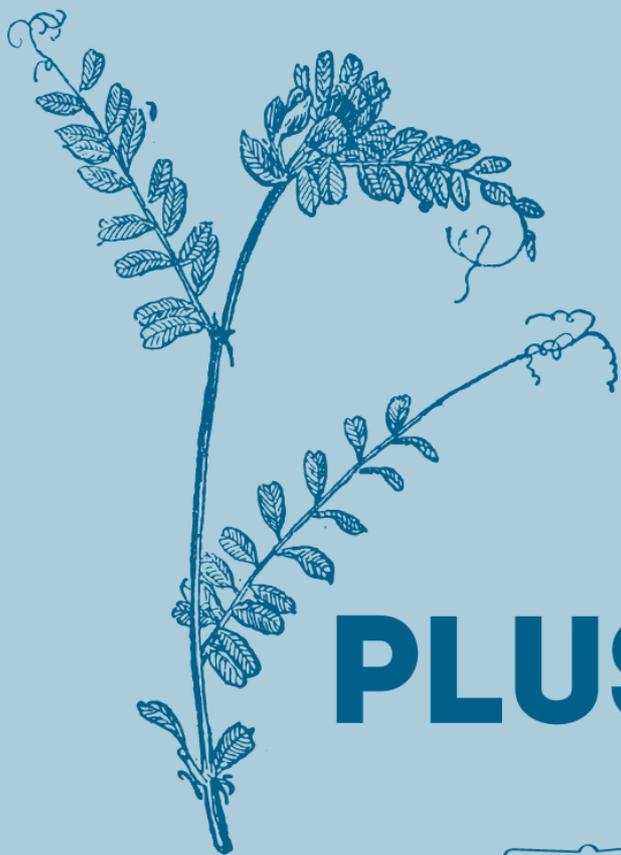
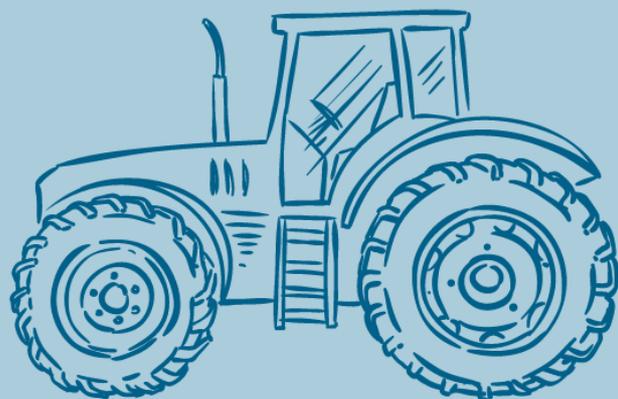
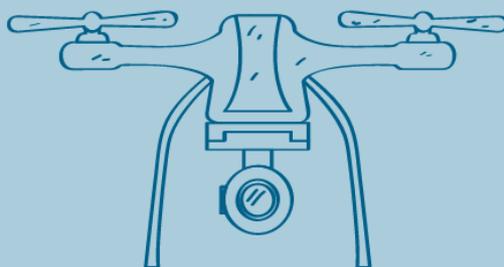


LEVIERS POUR UNE TRANSITION VERS DES



SYSTEMES DE GRANDES CULTURES PLUS DURABLES



Anais Levoir

Novembre 2021

Farm Europe est un think tank multi-culturel fondé en 2014 qui vise à stimuler la réflexion sur les économies rurales de l'Union européenne. Le think tank, met l'accent sur l'agriculture et les politiques alimentaires, en particulier la Politique Agricole Commune (PAC), les normes alimentaires, la chaîne alimentaire, l'environnement, l'énergie et le commerce.

Table des matières

Synthèse	1
Contexte	1
i. Les cultures arables européennes	1
I. Surface et zones géographiques.....	1
B. Production	1
C. Les principaux intrants	1
ii. Le secteur agricole face aux enjeux de production et de sécurité alimentaire	2
iii. Le secteur agricole face aux enjeux climatiques.....	3
iv. Le secteur agricole face aux enjeux environnementaux	4
v. Réponses politiques aux enjeux climatiques et environnementaux.....	4
vi. Le secteur agricole face aux enjeux économiques	4
Méthodologie	6
Résultats	9
I. Modification des agrosystèmes	9
A. Diversification des rotations	9
1. Résultats obtenus.....	9
2. Remarques.....	13
3. Bilan.....	13
B. Occupation du sol.....	14
1. Associations de cultures	14
a. Résultats obtenus.....	14
b. Remarques.....	18
c. Bilan	18
2. Gestion de l'interculture	18

a.	Cultures intermédiaires	18
i.	Résultats obtenus	19
ii.	Remarques	26
iii.	Bilan	27
b.	Faux semis	27
i.	Résultats obtenus	29
ii.	Remarques	32
iii.	Bilan	32
c.	Les résidus de culture	33
i.	Résultats obtenus	34
ii.	Remarques	39
iii.	Bilan	40
3.	Introduction d'infrastructures agro-écologiques	41
a.	Résultats obtenus.....	41
b.	Remarques.....	43
c.	Bilan	43
C.	Choix variétaux	44
1.	Sélection variétale	44
a.	Résultats obtenus.....	44
b.	Bilan	47
2.	Mélanges de variétés sur une même parcelle.....	47
a.	Résultats obtenus.....	47
b.	Remarques.....	50
c.	Bilan	51
D.	Travail du sol	52
1.	Résultats obtenus.....	52

2.	Remarques.....	60
3.	Bilan.....	61
II.	Effcience de l'usage des intrants	62
A.	Agroéquipement.....	62
1.	Traitements phytosanitaires.....	62
a.	Résultats obtenus.....	62
b.	Bilan	64
2.	Irrigation	65
a.	Modernisation des systèmes d'irrigation	65
i.	Résultats obtenus	65
ii.	Remarques	70
iii.	Bilan	70
b.	Autres.....	71
i.	Le pompage et le transport d'eau.....	71
ii.	Le choix des buses.....	71
iii.	Autres équipements	71
3.	Direction assistée et système de gestion d'une circulation raisonnée	71
a.	Résultats obtenus.....	72
b.	Bilan	74
B.	Agriculture de précision	75
1.	Outils d'aide à la décision	76
a.	Résultats obtenus.....	76
b.	Remarques.....	80
c.	Bilan	80
2.	Application de doses d'intrants ajustées et localisées	81
a.	Résultats obtenus.....	81

i.	Ajustement des traitements phytosanitaires	81
ii.	Fertilisation à taux variable	83
iii.	Irrigation à taux variable.....	85
b.	Remarques.....	88
c.	Bilan	88
3.	Robots de désherbage chimique.....	89
a.	Résultats obtenus.....	90
b.	Remarques.....	91
c.	Bilan	91
C.	Les stabilisateurs de nitrification	92
1.	Résultats obtenus.....	92
2.	Remarques.....	93
3.	Bilan.....	93
D.	Autres alternatives	94
III.	Substitution des intrants	94
A.	Pesticides	94
1.	Lutte physique	94
a.	Désherbage mécanique	94
i.	Résultats obtenus	94
ii.	Remarques	96
iii.	Bilan	97
b.	Désherbage mécanique robotisé	97
i.	Résultats obtenus	97
ii.	Remarques	99
iii.	Bilan	99
2.	Biocontrôle	99

a.	Lutte biologique	100
i.	Résultats obtenus	100
ii.	Remarques	102
iii.	Bilan	103
b.	Lutte biotechnique	103
i.	Confusion sexuelle	103
ii.	Stimulateurs de défenses naturelles.....	103
c.	Efficacité du biocontrôle.....	105
B.	Engrais.....	105
1.	Engrais organique.....	105
a.	Résultats obtenus.....	106
b.	Remarques.....	108
c.	Bilan	108
2.	Engrais verts	109
a.	Résultats obtenus.....	109
b.	Remarques.....	111
c.	Bilan	111
	Discussion	112
	Bibliographie.....	114
	Table des tableaux	132
	Table des figures	134
	Liste des sigles et acronymes	135

Synthèse

Pour faire face aux enjeux climatiques et environnementaux, l'UE propose la mise en place d'un Pacte Vert pour l'Union Européenne se déclinant à travers des propositions de mesures qui ciblent les différents secteurs économiques, dont l'agriculture. Afin d'atteindre la neutralité climatique en 2050, la Commission souhaite que l'agriculture l'atteigne dès 2035 pour ensuite prendre en charge une partie des émissions des autres secteurs.

Dans ce cadre, les stratégies Farm 2 Fork et Biodiversité proposent de réduire d'ici 2030 l'usage de pesticide de 50% et d'engrais de 20%. Elles suggèrent que 25% des surfaces agricoles soient en agriculture biologique et que les éléments paysagés à haute diversité couvrent 10% des surfaces agricoles.

Or, les stratégies, telles que proposées par la Commission, induiraient une baisse moyenne des rendements de 5%, une baisse de la production agricole européenne de 10 à 15% selon les secteurs, une réduction des exportations de 20%, une hausse drastique des importations et une baisse des revenus agricoles de 8 à 16% selon les études d'impacts réalisées. L'étude du département recherche de la Commission (JRC) conclut aussi à ces résultats, nonobstant des hypothèses de limitation artificielle des importations et de 60% des fermes en agriculture de précision en 2030. Cette dernière hypothèse suggérerait des investissements massifs à opérer par des filières voyant leurs revenus fondre. Les bénéfices environnementaux estimés sont tenus voire nuls au prix d'une décroissance socialement et économiquement onéreuse.

De telles conséquences pourraient être dramatiques pour le secteur agricole européen qui embauche plus de 9.2 millions de personnes et qui occupe 38% du territoire européen. Le secteur grandes cultures est d'autant plus exposé qu'il occupe plus des deux tiers des surfaces de terres arables européennes.

Non seulement elles seraient de nature à mettre en cause la capacité des agriculteurs à répondre aux besoins d'approvisionnement des marchés européens et de stabilité des marchés alimentaires mondiaux, mais elles auraient un impact notable sur l'équilibre économique des exploitations agricoles, des filières associées et des régions rurales où elles sont implantées.

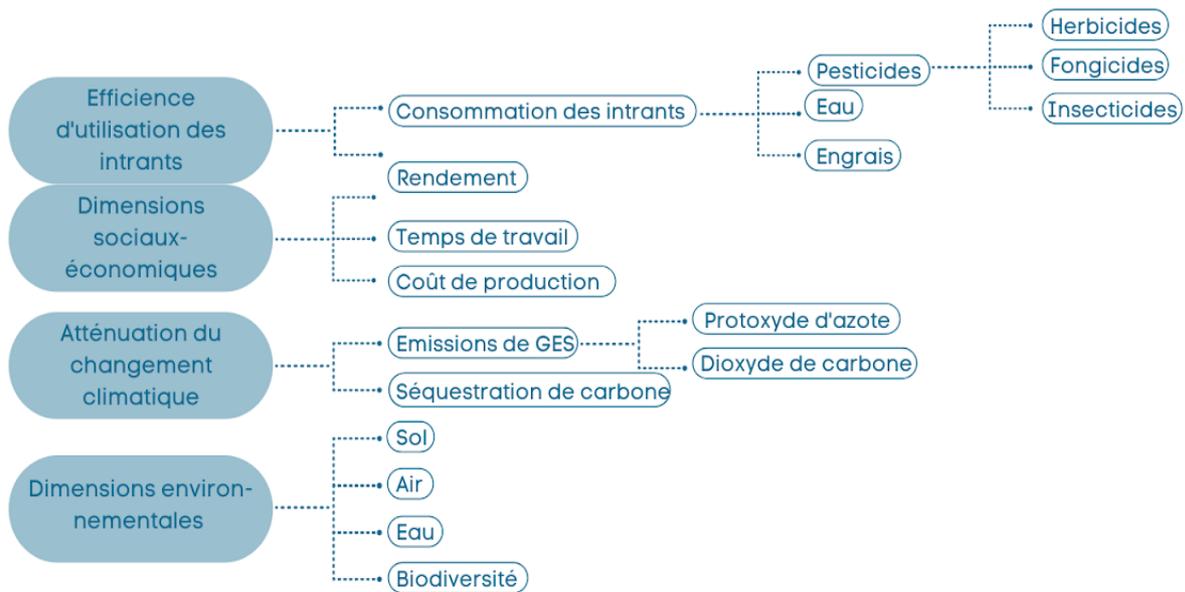
Un scénario de restructuration du secteur agricole, de réduction du nombre d'exploitations et d'abandon de terre du fait de décisions politiques n'est pas envisageable.

Ces constats suggèrent la **nécessité de définir une autre voie pour répondre aux principes du Pacte Vert européen et d'une transition écologique responsable et efficace des secteurs agricoles.**

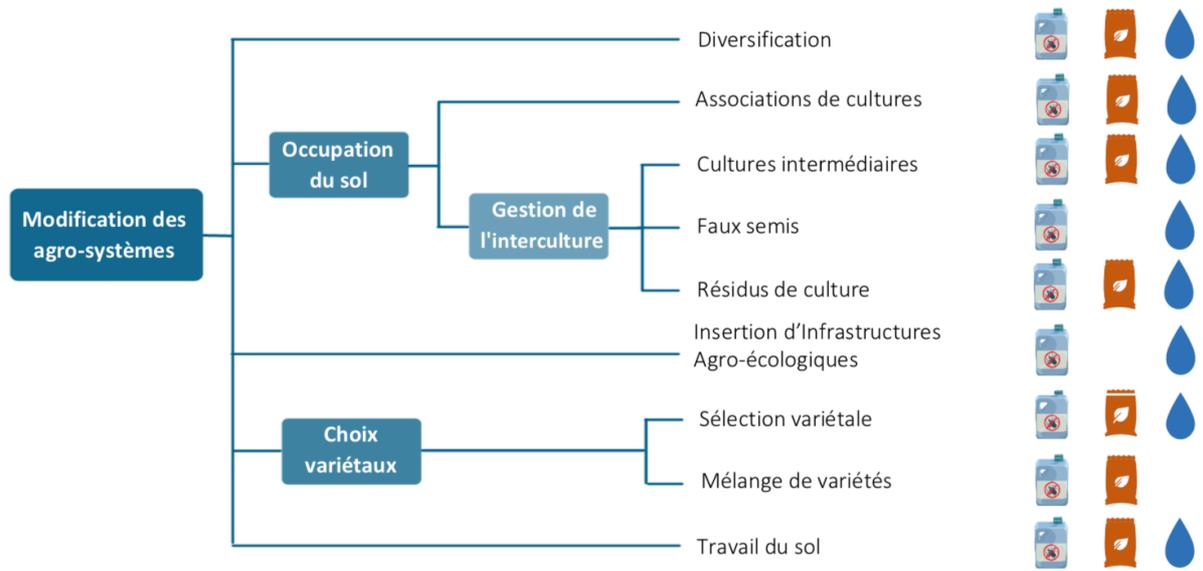
Ce rapport répertorie et analyse des pratiques activables pour atteindre les objectifs européens du Green Deal, tout en confortant les capacités de production, les finances des agriculteurs et leur temps de travail.

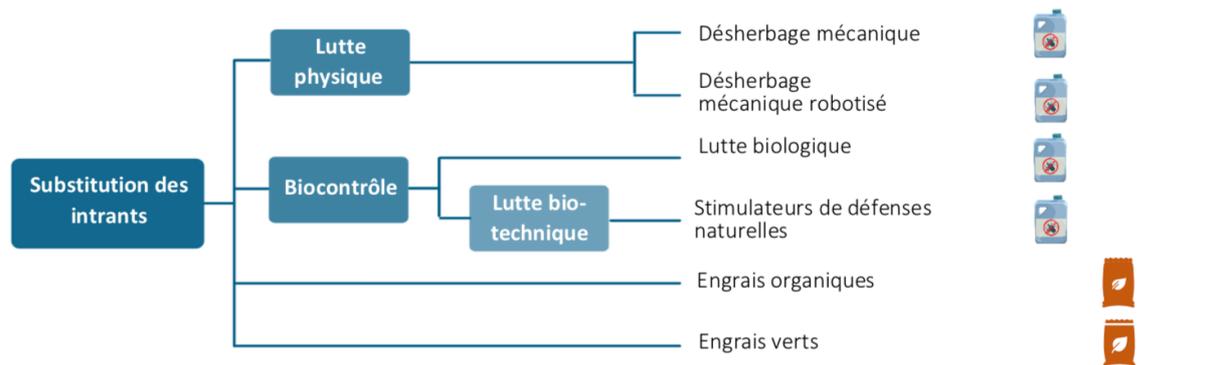
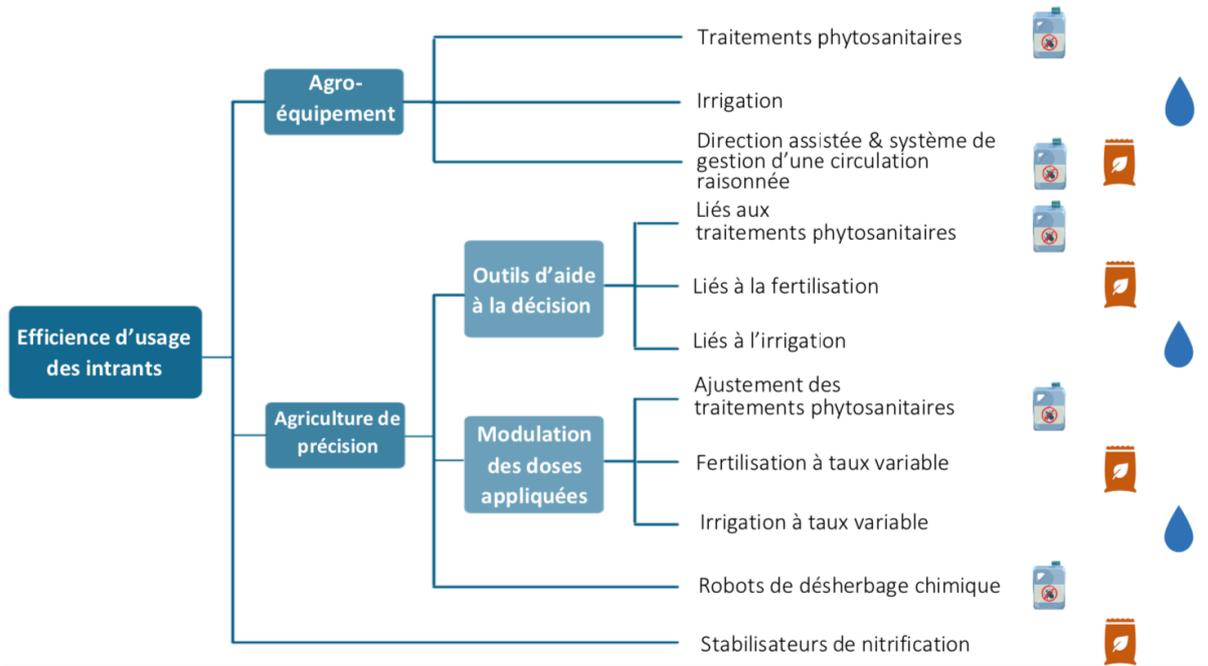
De nombreux travaux européens ont évalué et quantifié l'effet de diverses pratiques à l'échelle de l'exploitation ou de la parcelle. Cette étude s'est attachée, à partir d'une revue de ces travaux, à répertorier les pratiques ayant les meilleurs couples d'impacts environnementaux et climatiques/impacts économiques et sociaux.

Les différents éléments comparés sont donnés ci-dessous :



Les pratiques étudiées et les intrants dont elles affectent l'usage sont :





Les résultats qui en émanent peuvent être résumés comme suit :

Les pratiques qui ressortent comme des solutions pouvant être les plus bénéfiques pour tendre vers les objectifs de neutralité d'émissions GES et d'usage économe des intrants sont, au niveau de la reconception du système :

- La diversification des rotations et la couverture maximale du sol, notamment lors de la période d'interculture ;
- Un travail du sol alternant labour et travail du sol plus superficiel ;
- La sélection de variétés résistantes, précoces ou tardives.

A ces solutions s'additionnent différents moyens pour améliorer l'efficacité d'utilisation des pesticides, des engrais et de l'irrigation comme :

- La modernisation des agroéquipements ;
- Les préconisations d'OAD ;
- L'application locale et ajustée des intrants.

Certaines de ces solutions peuvent parfois s'avérer coûteuses, d'autres, comme **les OAD ou le remplacement de certaines pièces** sont des alternatives abordables.

Les pratiques qui cherchent à substituer les pesticides ne permettent généralement pas de s'en passer complètement. Ce sont des alternatives préventives ou complémentaires. La substitution des engrais de synthèse par des engrais verts ou les engrais organiques apparaît une solution intéressante pour réduire les émissions de GES. La mise en œuvre d'engrais verts peut cependant être technique et le recours aux engrais organiques dépend de la capacité à se fournir en matières organiques.

Le choix des pratiques dépend de nombreux facteurs qui influencent les effets des dites pratiques sur l'utilisation des intrants, sur le climat, l'environnement et les conditions socio-économiques. Certaines pratiques peuvent ainsi avoir des effets bénéfiques ou négatifs selon les régions considérées de l'Europe.

Un accompagnement local voire régional des agriculteurs paraît utile pour les aider à identifier les ensembles de pratiques correspondant à leur contexte. **Des formations sont nécessaires** pour leur permettre de prendre en main rapidement et d'utiliser au maximum le potentiel de leurs agroéquipements. **Les préconisations des OAD doivent également être ajustées aux conditions locales.**

Au-delà de l'appui à l'accompagnement des agriculteurs, **il est primordial d'assurer l'accessibilité des agroéquipements, des AOD et de soutenir la modernisation du parc matériel pour améliorer l'efficacité d'utilisation des intrants.** C'est une priorité que devraient se donner les politiques publiques.

La robotique, quant à elle, est aujourd'hui trop récente et trop chère. D'ici 15 ou 20 ans, elle pourrait être une solution supplémentaire prometteuse.

Contexte

i. Les cultures arables européennes

1. Surface et zones géographiques

Les surfaces de terres arables occupent 99 millions d'ha en 2019 en Europe. Cela correspond à 60% des surfaces agricoles européennes et à 6% des surfaces occupées par les cultures arables et permanentes mondiales (Harrison, 2002). Plus de la moitié de la superficie des terres arables se situent en France (18%), en Espagne (12%) en Allemagne (12%) et en Pologne (11%). Les deux tiers des surfaces de terres arables sont cultivés dans des exploitations spécialisées en grandes cultures.

Les céréales, les oléagineux et les protéagineux sont les principales cultures cultivées sur ces terres, suivis des racines et tubercules, des légumes de pleins champs et des cultures de fibres.

B. Production

De grandes disparités dans la taille des exploitations existent. La taille moyenne des exploitations spécialisées dans les cultures de céréales, de protéagineux et d'oléagineux est de 60 ha. C'est en Grèce que se situent les plus petites et en République Tchèque que se situent les plus grandes exploitations. La taille moyenne des exploitations grecs et tchèques sont respectivement de 8 ha et de 167 ha (Eurostat, 2021a).

Plus de 85% des exploitations spécialisées en céréalicultures, en production de plantes oléagineuses et protéagineuses se trouvent en Roumanie (441 000 exploitations), en Pologne (393 000 exploitations) et en Italie (173 000 exploitations) (Eurostat, 2021a).

L'Europe exporte environ 20% de sa production de blé. De grandes quantités d'oléagineux et d'aliments pour l'élevage et de riz sont importées (European Commission, 2021).

C. Les principaux intrants

Consommation de pesticides

Les trois principaux pesticides sont les fongicides, les pesticides et les insecticides. La consommation de pesticides est très variable selon les contextes pédoclimatiques, les cultures et le choix des pratiques mises en œuvre. Il est cependant estimé pour une grande culture standard que 10% des pesticides appliqués sont des insecticides et que les 90% restant correspondent aux herbicides et insecticides (ADEME, 2021).

Les fongicides semblent être les pesticides les plus utilisés en Europe, à raison d'en moyenne 1,14 kg/ha en 2019. L'usage de fongicide est de 0,64 kg/ha en moyenne en 2019. De grandes disparités existent entre les différents pays pour les fongicides et les pesticides. Les insecticides semblent être les pesticides les moins utilisés à raison de 0,24 kg/ha en moyenne. Ils sont surtout utilisés dans la moitié sud de l'Europe. Leur vente est plus faible dans la moitié nord (Eurostat, 2021d, 2021c).

Consommation d'azote

Les besoins azotés varient selon les cultures. Par exemple, les exportations d'azote des plantes entières de colza avoisinent les 250 kg d'azote (N) par hectare (ha), des cultures de betteraves environ 230 kg N/ha, des cultures de pommes de terre environ 218 kg N/ha, des cultures de maïs environ 185 kg N/ha, des cultures de blé environ 170 kg N/ha et des cultures d'orge 146 kg N/ha. L'apport d'azote est calculé à partir des objectifs de rendement des cultures et des reliquats azotés de la culture précédente (UNIFA, 2021).

Selon Hourcade *et al.*, (2015), un apport azoté de 160 kg/ha a lieu en moyenne pour un blé, ce qui revient environ à 20-25% des charges opérationnelles. Il estime que 50 à 70% de l'azote épandue est assimilé par la culture. D'autres auteurs affirment que 50 à 70 % de l'azote épandue est perdue à cause de la lixiviation de la volatilisation ou de la dénitrification.

Consommation d'eau

L'agriculture emploie 33% de l'eau consommée en moyenne en Europe. Cette valeur monte jusqu'à 80% dans les pourtours de la méditerranée. Les principales cultures irriguées sont le maïs, le riz, la pomme de terre et la betterave. L'irrigation est mobilisée avant tout en France, en Espagne et en Italie (Eurostat, 2021b). A côté de l'irrigation, certaines pratiques agricoles peuvent influencer le volume d'eau de la réserve utile.

Des intrants interconnectés

La disponibilité en eau et l'humidité influencent le besoin de pesticides car une humidité trop élevée risque de favoriser le développement d'adventices, ce qui peut entraîner une concurrence pour l'azote. Une augmentation de la présence de maladies fongiques peut aussi avoir lieu dans ces conditions. A l'inverse, une réduction de l'assimilation de l'azote peut être observée lors d'un stress hydrique car les nutriments ne peuvent être absorbés qu'en présence d'eau.

ii. [Le secteur agricole face aux enjeux de production et de sécurité alimentaire](#)

Le secteur agricole doit produire suffisamment pour couvrir les besoins d'une population croissante alors que les moyens humains chutent (Gaba et al., 2016).

Le nombre d'agriculteurs en Europe a baissé de 25% entre 2005 et 2015 et le nombre d'exploitations s'est réduit de 20% entre 2007 et 2013. Cette tendance risque de s'accroître avec plus de la moitié des agriculteurs qui a plus de 55 ans et seulement 6% d'entre eux qui ont moins de 35 ans (Comité européen des régions, 2018).

Maintenir une production malgré la baisse d'effectif signifie augmenter la productivité des exploitations. Cela implique, entre autres, des investissements et pose la question des ressources financières nécessaires disponibles au sein des exploitations agricoles pour le faire, donc de la rentabilité de l'activité agricole qui s'avère à la peine ces deux dernières décennies. Face à la réduction tendancielle des prix des matières premières agricoles, à la volatilité croissante des marchés mondiaux, il s'agit de conforter la place des agriculteurs dans la chaîne d'approvisionnement et de leur donner les moyens de dégager un revenu décent et une capacité d'investissement pour se projeter. Ce revenu doit assurer rémunération du travail et pérennité de l'entreprise (investissements, anticipation aléas...) (European Commission, 2019).

Le secteur agricole a un rôle majeur dans l'établissement et le maintien de la sécurité alimentaire. La production, la disponibilité, le stockage de denrées alimentaires en quantité suffisante relèvent de sa responsabilité. Au-delà de l'accès physique des aliments, l'accès économique doit être garanti, en maintenant des prix abordables par rapport au revenu des consommateurs. La sécurité alimentaire est présente lorsque la disponibilité de nourriture et son accès économique a lieu pour tous les êtres humains à tout moment, et cela à l'échelle nationale, européenne et internationale (FAO, FIDA, OMS, 2021).

iii. Le secteur agricole face aux enjeux climatiques

Le secteur agricole est tributaire de la météo. Il doit aujourd'hui faire face à un décalage des saisons, ainsi qu'à une augmentation de la température, de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques tels que des risques de fortes chaleurs, sécheresses ou fortes précipitations.

Ce secteur est à la fois le seul secteur économique apte à stocker du carbone et un secteur émetteur de GES (Gaz à effet de Serre). En 2019 l'agriculture était émettrice d'environ 386 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (eCO₂), ce qui correspondait à 10% des émissions totales européennes. Près de 40% de ces émissions, soit 152 millions de tonnes d'eCO₂ étaient liées aux émissions de protoxyde d'azote (N₂O), le reste correspondant essentiellement aux émissions de méthane (CH₄) et à la gestion des effluents d'élevage.

Les grandes cultures ont un rôle négligeable sur les émissions de CH₄ (Guyomard *et al.*, 2013). En revanche, la fertilisation azotée est responsable de 50 à 60% des émissions de N₂O, émissions qui sont estimées monter de 35 à 60% entre 2007 et 2030 au niveau mondial (IPPC, 2007). D'autres émissions de GES ont lieu indirectement lors de la fabrication des engrais de synthèse. Différentes sources estiment que les émissions totales de GES liées à l'épandage d'un kg d'azote reviennent à émettre entre 2,6 et 8 kg d'eCO₂ (IPPC, 2007; Stagnari *et al.*, 2017; *Whealbi*, 2021). Des émissions indirectes de CO₂ ont également lieu lors de la fabrication et de l'épandage de pesticides. Ces émissions sont par défaut estimées à 9,2 kg eCO₂ par tonne de matière active (ADEME, 2021).

Pour lutter contre les effets du changement climatique, l'agriculture, comme tous les autres secteurs, doit tendre à réduire ses émissions de GES. Elle a également la capacité de stocker du carbone dans ses sols. L'objectif qui lui est assigné dans le cadre du Green deal est d'arriver à une neutralité d'émissions d'ici à 2035.

iv. Le secteur agricole face aux enjeux environnementaux

Outre les enjeux liés au climat, l'agriculture est en constante interaction avec les ressources naturelles abiotiques (eau, sol et air), la biodiversité et les écosystèmes. Elle est bénéficiaire et fournisseuse, par les pratiques mises en place et services écosystémiques. Mais elle peut aussi recevoir et émettre des impacts négatifs sur ces composantes. Il s'agit notamment de la pollution des écosystèmes par les intrants impliqués, de la pression sur la ressource en eau qui est particulièrement vulnérable dans les régions méditerranéennes, de la dégradation de la fertilité des sols et de la perte de biodiversité.

v. Réponses politiques aux enjeux climatiques et environnementaux

Pour faire face aux enjeux climatiques et environnementaux, l'UE propose un ensemble de mesures dans son Pacte Vert :

La Commission s'est fixée d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050 et de réduire de 55% les émissions en 2030 par rapport à 1990. Pour se faire, la régulation LULUCF (Land Use, Land Use change and Forestry), qui couvre les émissions et des absorptions de GES provenant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la forêt, est en cours de révision. Dans la proposition de révision, l'agriculture doit atteindre la neutralité climatique d'ici 2035 pour pouvoir ensuite prendre en charge des émissions des autres secteurs. En parallèle, un système de Carbon Farming européen est en cours d'élaboration.

La stratégie de la ferme à la fourchette (F2F) et la stratégie biodiversité proposées par la Commission visent, d'ici 2030, une réduction de 50% de l'usage des pesticides chimiques et de 20% des engrais. Elles souhaitent atteindre 10% des surfaces agricoles avec des éléments paysagés à haute diversité et 25% des surfaces en agriculture biologique.

vi. Le secteur agricole face aux enjeux économiques

Les stratégies F2F et biodiversité pourraient induire une baisse de la production d'au moins 5% pour le secteur agricole, une réduction des exportations d'environ 20% et une baisse des revenus agricoles de 8 à 16%, selon les études réalisées par la Commission et par l'USDA-ESR (Farm Europe 2021).

De tels impacts s'additionnent aux enjeux climatiques et environnementaux auxquels doit faire face le secteur agricole européen. L'idée d'une restructuration du secteur agricole, d'une réduction drastique du nombre d'exploitations et d'abandon de terres n'est pas envisageable. Les agriculteurs sont, de par les biens et les services qu'ils fournissent, vitaux à la survie et au développement de nos sociétés.

Il s'agit dès lors de fortifier leur résilience, leur permettant de surmonter les crises liées à la fois aux marchés mondiaux et au climat pour qu'ils puissent répondre aux besoins d'approvisionnement au sein de l'UE et de stabilité des marchés alimentaires globaux (Comité européen des régions, 2018).

Des actions concrètes assurant une utilisation efficiente des intrants, une réduction des émissions de GES, une augmentation du stockage de carbone dans les sols et la préservation de l'environnement, tout en garantissant aux agriculteurs de bonnes conditions de travail et une juste rémunération, ainsi qu'au secteur la capacité à se développer, permettraient d'atteindre les objectifs européens en répondant aux enjeux économiques, environnementaux et de sécurité alimentaire européenne et mondiale.

De nombreux travaux ont évalué et quantifié l'effet de diverses pratiques dans les exploitations agricoles.

Cette étude a pour but de répertorier les pratiques dont l'efficacité sur l'environnement et le climat est reconnue et qui confortent les capacités de production, les finances des agriculteurs, et leur temps de travail.

Méthodologie

Cette étude a compilé les informations relatives à l'effet des pratiques sur l'efficacité d'utilisation des intrants, sur les dimensions socioéconomiques, sur l'atténuation du changement climatique et sur l'environnement. Elle se base sur une revue bibliographique d'études, de méta-analyses, d'articles et de fiches pratiques traitant des différentes pratiques réalisées en cultures arables. La majorité de ces documents sont issus de revues agricoles, d'instituts et de centres de recherche européens.

Les pratiques étudiées ont lieu au niveau des parcelles agricoles. Ces pratiques sont transversales à tous les systèmes de production et sont mises en place lors de la conception des rotations ou entre la préparation des sols et les récoltes. Les pratiques liées au stockage des récoltes ne sont pas concernées.

Elles se répartissent en trois catégories selon le concept ESR (Efficacité – Substitution – Re-conception) (Gayraud and Delva, 2015). Elles sont données en Figure 1 avec les intrants dont elles affectent l'usage.

L'efficacité analyse le rapport entre le rendement obtenu et la consommation d'intrant (pesticides, engrais ou eau) nécessaire pour l'obtenir. Plus la consommation d'intrant est faible, meilleure est l'efficacité.

L'effet de la pratique sur l'efficacité d'utilisation des intrants est analysé à partir de :

- Son effet sur la consommation des intrants :
 - Pesticides (herbicides, fongicides et insecticides) ;
 - Les apports azotés ;
 - L'eau ;
- Son effet sur le rendement.

L'effet de la pratique sur des dimensions socio-économiques a été analysé à partir de :

- Son effet sur le rendement ;
- Son effet sur le temps de travail ;
- Son effet sur le coût de production. Il prend en considération le coût des intrants, dont le carburant, celui de la main d'œuvre, de la traction et du matériel nécessaire, selon les informations à disposition.

Les investissements relatifs aux machines nécessaires pour réaliser les pratiques n'ont pas été pris en compte au vu des multiples façons de l'envisager (CUMA, financement EU, coopérative, organisme tiers, soi-même...). Le bilan économique est difficile à chiffrer car il est propre aux caractéristiques de chaque exploitation.

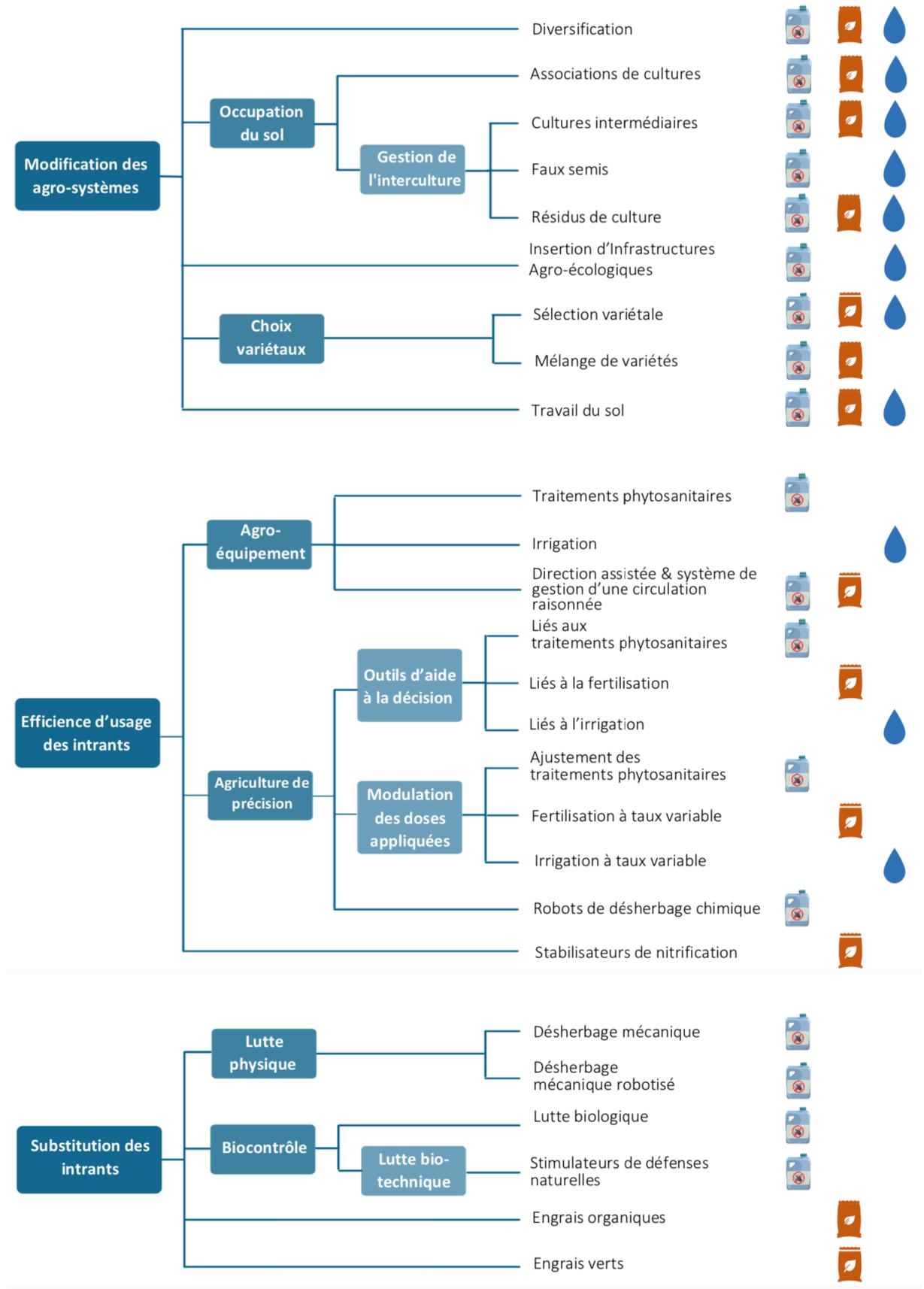


Figure 1 - Les pratiques étudiées et les intrants dont elles affectent l'usage

L'effet de la pratique sur l'atténuation du changement climatique est étudié à partir de :

- Des émissions directes de N₂O et de CO₂ et, lorsque des données étaient disponibles, les émissions indirectes de CO₂ liées à la fabrication et au transport des intrants.
- L'effet de la pratique sur la séquestration de carbone.

L'effet de la pratique sur l'environnement a été étudiée de façon quantitative par l'effet sur l'efficacité d'utilisation des intrants et de façon qualitative sur :

- La qualité de l'air qui peut être polluée par les pesticides et les émissions de NH₃ (ammoniac).
- La qualité du sol, qui correspond à :
 - Sa fertilité chimique : production/dégradation des MO.
 - Sa fertilité biologique : biodiversité des micro-organismes assurant l'activité biologique du sol.
 - Sa fertilité physique : perméabilité, résistance à la compaction, au tassement, à l'érosion et à la lixiviation.
- L'eau :
 - Rétention d'eau dans le sol, lutte contre le ruissellement.
 - Qualité de l'eau : filtration et dégradation des pesticides. Lutte contre le transfert de pesticides, contre la lixiviation et l'eutrophisation.
 - La préservation de la biodiversité macro et microscopique, de la faune et de la flore.

Les données transversales

Quelle que soit la pratique, la main d'œuvre coûte entre 15 et 18€/ha. On peut également considérer qu'1 kg d'engrais azoté de synthèse émet 2.6 à 8 kg de eCO₂ et que 1% de l'azote appliqué est émis en N₂O (IPPC, 2007; Stagnari *et al.*, 2017; *Whealbi*, 2021). Ces informations permettent de compléter les informations relatives au coût de production et aux émissions de GES lorsqu'elles sont croisées avec les données sur le temps de travail ou sur les quantités d'engrais épandues (Nistor *et al.*, 2019).

Mise en avant des pratiques à promouvoir

Beaucoup de facteurs interfèrent les essais réalisés, comme le contexte pédoclimatique, le type d'exploitation, le matériel à disposition, les réglages, les variétés, l'histoire de la parcelle... A ses facteurs s'ajoutent les autres pratiques réalisées sur la parcelle. Le choix d'analyser par intrants et par pratique est, de fait, réducteur. Il s'agit ici de dégager les pratiques qui permettraient d'atteindre les objectifs européens de transition et qui maintiennent ou améliorent les conditions de travail et la rémunération des agriculteurs.

Résultats

I. Modification des agrosystèmes

A. Diversification des rotations

Toute culture réinsérée dans une rotation est considérée comme une culture de diversification dès qu'elle ne fait pas partie de la rotation type. Les cultures de diversification les plus communes sont les légumineuses, le sorgho, le seigle, les brassicacées et le lin. Les cultures faisant généralement partie des rotations, comme le tournesol ou le maïs, sont considérées comme des cultures de diversification lorsqu'elles sont implantées dans des bassins où elles sont peu présentes dans les rotations types. Dans les zones à proximité d'élevage, des espèces prairiales peuvent être utilisées (Carpentier 2014; Jabran et al. 2015; Martin-Monjaret 2019). Ces cultures peuvent être des cultures de rente, des cultures intermédiaires ou des cultures à associer. Elles permettent d'allonger les rotations, de varier les périodes et les méthodes d'implantation et d'augmenter la couverture du sol.

1. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

L'effet de la diversification des rotations peut diminuer jusqu'à 40% l'occurrence des adventices par l'introduction d'espèces cassant leur cycle (Mayerová, Madaras, and Soukup 2018; Philips 2017; Wozniak et al. 2019). Les rotations considérées comme diversifiées¹ correspondent aux rotations les moins consommatrices de pesticides, à l'opposé des rotations simples (Lechenet et al. 2014; Mayerová, Madaras, and Soukup 2018). Selon les sources, une protection des cultures adaptée à la pression observée permet de réaliser une économie d'un à deux traitements de pesticide, soit d'économiser jusqu'à 50€/ha par culture, ou de réduire de 40% l'IFT (Preissel et al. 2017; Verdier et al. 2019).

Engrais

Les résultats obtenus par Lechenet et al. (2014) suggèrent que les rotations diversifiées permettent de réduire les quantités d'engrais azotés à épandre. Un moindre recours aux engrais est d'autant plus marqué pour les rotations comprenant des légumineuses par rapport à leur témoin (Lechenet et al. 2014). Ces cultures ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique, de par leur symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium*. Leur aptitude à fournir de l'azote à la culture suivante est détaillée dans la partie sur les engrais verts, page 109.

¹ dont la fréquence des cultures au sein de la rotation est faible et leurs effets sur les bio-agresseurs, sur la structure du sol et sur la disponibilité en azotes sont positifs pour la culture suivante (Lechenet et al. 2014).

Eau

La consommation d'eau dépend des cultures présentes dans la rotation et du contexte pédoclimatique (Guyomard et al. 2013). La diversification des cultures permet de réduire la présence d'une culture fortement consommatrice d'eau dans la rotation en insérant d'autres cultures moins consommatrices. Par exemple, un maïs 100% irrigué peut être remplacé par des céréales sèches ou d'autres cultures irriguées moins consommatrices d'eau. Une attention doit être portée aux besoins hydriques des cultures lors du choix d'espèces de diversification.

La stratégie d'esquive cherche à éviter de faire coïncider les phases critiques ou sensibles du cycle cultural avec les périodes de déficit hydrique. Les cultures pouvant être semées tôt, en automne ou en fin d'hiver sont à privilégier, pour que ces phases sensibles à la teneur en eau aient lieu avant l'été. Or, parmi ces cultures se trouvent les céréales d'hiver et le colza, qui font partie des cultures les plus couramment implantées (Aspar 2019).

Effets sur le rendement

L'effet de la diversification et de l'allongement des rotations est à évaluer à l'échelle des rotations. L'insertion de légumineuses, par exemple, qui ont un rendement inférieur à celui des céréales, explique qu'une réduction de la productivité puisse avoir lieu entre deux rotations de même durée (Lechenet et al. 2014). Les légumineuses peuvent néanmoins améliorer les rendements des cultures suivantes. Ce phénomène est décrit dans la partie sur les engrais verts page 109.

Effets sur le temps de travail

Certains scientifiques estiment que l'allongement des rotations augmente le temps de travail par hectare d'une demie heure à deux heures par an (Hunt, Hill, and Liebman 2017; Davis et al. 2012; Verdier et al. 2019). D'autres affirment qu'il n'y a pas de corrélation entre la charge de travail et la diversification des rotations (Lechenet et al. 2014).

La diversification des cultures permet, de par la plus grande diversité des périodes de semis et de récolte, une répartition plus uniforme des pics de travail pour les agriculteurs. Cela augmente la flexibilité à l'échelle de l'exploitation (Lechenet et al. 2014).

Effets sur le coût de production

L'effet de l'allongement et de la diversification des rotations sur les coûts de production est mitigé et dépend des cultures implantées. Pour certains, l'allongement des rotations augmente la consommation de carburant. Cette augmentation est d'autant plus importante pour des rotations sans légumineuses que pour celles qui les incluent (Lechenet et al. 2014). Mais les réductions d'engrais et de pesticides peuvent contrebalancer cette augmentation de consommation de carburant.

La différence de marge brute entre des rotations avec et sans légumineuses varie d'un pays à un autre. Dans les meilleurs cas, l'introduction de légumineuses permet une augmentation de la marge brute d'en moyenne 22€/ha/an. Une baisse de la marge brute allant jusqu'à 108 €/ha/an a été constatée pour des cultures irriguées suite à l'introduction de légumineuses. Les conditions agronomiques et environnementales sont source de cette forte variabilité. En production fourragère, l'insertion de légumineuses permet une augmentation de la marge brute comprise entre 4 €/ha/an et 103 €/ha/an, partout en Europe. Les différences inter-régionales de marge brute sont également amoindries (Preissel et al. 2017).

Plus les rotations sont diversifiées, plus la sensibilité à la volatilité des prix est réduite (Lechenet et al. 2014).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les légumineuses émettent 5 à 7 fois moins de N₂O que les autres cultures (Stagnari et al. 2017). Lors de leur introduction dans les successions, une réduction de N₂O allant de 8 à 35% par an est observée en Allemagne, Italie, Suède, Roumanie ainsi qu'au Royaume-Unis (Preissel et al. 2017; Véricel et al. 2018).

Plus les rotations sont diversifiées, plus la consommation d'énergie et donc les émissions de CO₂ direct semble diminuer (Lechenet et al. 2014).

Cela permet de réduire de 9% en moyenne le bilan GES des rotations (Verdier et al. 2019).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Le risque d'augmentation des flux de lixiviation varie selon le mode d'introduction des cultures de diversification, leur place dans la rotation et l'échelle à laquelle il est comptabilisé (Véricel et al. 2018). On observe une augmentation de la lixiviation à l'automne suivant un pois ou un colza sans repousses par rapport à un blé, comme le montre le Tableau 1. La lixiviation à l'automne après un colza avec repousses est très amoindrie, voire inférieure à la lixiviation suivant un blé. Le

Tableau 2 montre qu'une diminution de la lixiviation a lieu à la suite d'un blé précédé d'un colza ou d'un pois, par rapport à un blé de blé. Une compensation interannuelle est observée à l'échelle des rotations, par rapport à des successions à base de céréales comme le montre le Tableau 3 (Beillouin et al. 2017).

Tableau 1 - Évolution de la lixiviation à l'automne suivant une culture de pois ou de colza, par rapport à une culture de céréale (Beillouin et al. 2017)

Culture	Culture de comparaison	Évolution de la lixiviation (kg N/ha)	Pays
Pois	Blé	De 0 à 11	France
Pois	Blé	0	Angleterre
Colza sans repousse	Blé	De + 5 à + 37	France Allemagne
Colza avec repousses	Blé	De - 30 à + 15	France
Pois	Orge	> 13	Danemark

Tableau 2 - Évolution de la lixiviation à l'automne suivant une culture de céréales précédée d'un pois ou d'un colza par rapport à une céréale précédée d'une céréale (Beillouin et al. 2017)

Culture	Culture précédente	Culture précédente de comparaison	Évolution de la lixiviation (kg N/ha)	Pays
Blé	Pois	Blé	-7	France
Blé	colza	Blé	- 9	France
Orge	Pois	Orge	- 13	Danemark
Blé	Pois	Orge	- 16	Danemark

Tableau 3 - Simulation de perte par lixiviation à l'échelle de successions culturales, en France sur 20 ans (Beillouin et al. 2017)

Succession	Lixiviation moyenne	Évolution de la lixiviation (kg N/ha) par rapport à la monoculture de blé
Monoculture de blé	35	
Colza blé pois	27	- 8
Colza en tête de succession	< à 24	> à - 15
Pois en tête	< à 29	> à - 6

L'insertion d'autres espèces cultivées au sein de la rotation améliore la biodiversité récoltée. Elles permettent d'alterner les produits phytosanitaires utilisés et donc de réduire les risques de résistance. La succession de différents types de racines améliore la structure et la qualité du sol et réduit les risques de compaction (Verdier et al. 2019; Preissel et al. 2017). Enfin, si les quantités de pesticides et les engrais sont adaptés à la pression de bio-agresseurs observée, elles permettent de réduire la toxicité de l'eau et de l'air (Hunt, Hill, and Liebman 2017).

2. Remarques

Le choix des cultures et leur insertion dans les rotations dépendent des bio-agresseurs présents dans les parcelles ainsi qu'à l'échelle régionale. Les conditions pédoclimatiques et socio-économiques dans lesquelles l'exploitation se trouve influencent également ce choix. Diversifier les rotations ne signifie pas remplacer massivement une culture par une autre mais introduire ponctuellement des cultures spécifiques adaptées au contexte régionale (Benoit MOUREAUX 2014). Un accompagnement peut s'avérer nécessaire.

L'allongement et la diversification des rotations multiplient les revenus, assurant ainsi une sécurité face aux aléas naturels. Les plus grandes exploitations bénéficient d'un plus gros portefeuille de culture à insérer dans les rotations (Weigel et al. 2018). Or l'insertion de cultures de diversification, notamment de légumineuses, dans les rotations peut fragiliser la performance économique des exploitations, ce qui explique les réticences de certains agriculteurs (Verdier et al. 2019; Baddeley et al. 2017). Elles peuvent avoir un rendement plus fluctuant, ainsi qu'une productivité et un prix de revient bien inférieurs à ceux obtenus pour les céréales. Les débouchés en aval ne sont pas toujours garantis. Cela explique l'importance de la spécialisation en céréales que l'on observe en Europe et la nécessité d'importer du soja (Preissel et al. 2017).

3. Bilan

L'intérêt des cultures de diversifications en termes de productivité est à regarder à l'échelle de la rotation car leurs rendements peuvent être faibles, mais elles peuvent accroître ceux de la culture suivante. L'effet de la diversification sur le temps de travail est discuté. Les pics de travail sont mieux répartis et la sensibilité à la volatilité des prix est réduite. Ces cultures peuvent diminuer le recours aux engrais et aux pesticides, mais leur effet sur la consommation de carburant est mitigé. La marge brute dépend des rendements obtenus.

Les rotations peuvent devenir moins dépendantes de la ressource en eau. Les périodes de déficit hydrique peuvent être esquivées pour certaines cultures. L'insertion de cultures de diversification permet de réduire la consommation d'énergie directe et donc des émissions de GES. Les quantités d'azote lixiviées peuvent être compensées entre les cultures. Les risques de résistance des bio-agresseurs et de toxicité de l'air et de l'eau sont réduits. Une amélioration de la biodiversité, de la qualité et de la structure du sol est constatée.

La diversification des rotations est une combinaison de solutions spécifiques au contexte de la parcelle. Les effets mentionnés ci-dessus dépendent du choix des cultures à insérer, de leur place dans la rotation et de façon dont elles sont implantées et récoltées.

B. Occupation du sol

1. Associations de cultures

L'association ou le chevauchement d'au moins deux espèces compatibles en même temps sur une même parcelle permet d'améliorer l'efficacité de l'eau, des nutriments, de la lumière, et des terres agricoles utilisées (Jabran et al. 2015). Les cultures associées peuvent être utilisées pour réduire la pression des bio-agresseurs, en particulier des adventices.

Il peut s'agir d'associations de cultures de rente uniquement ou de cultures de rente avec des cultures compagnes. Elles peuvent prendre différentes configurations (Laurent Bedoussac 2009) :

- Des céréales et des légumineuses peuvent être semées ensemble dans des cultures associées en mélange (mixed cropping). Les densités de semis sont plus faibles, entre 50% et 75% que lorsque les espèces pures sont cultivées (L. Bedoussac et al. 2011).
- Les cultures peuvent être plantées en rangs alternés ou entre les rangs de la culture principale, comme un maïs (Trezzi et al. 2016).
- Elles peuvent également être implantées en bandes mono-spécifiques plus ou moins larges (strip intercropping). C'est le cas pour le coton et le sorgho ou le tournesol ou pour certaines céréales et légumineuses (Kandhro et al. 2014).
- Deux espèces se chevauchent durant une certaine période de leur développement dans les cultures relais. Une culture rapide peut être semée en même temps qu'une culture plus lente, pour être récoltée avant la seconde afin de la laisser se développer. Une autre alternative est de planter une seconde culture peu avant la maturité de la première qui sera rapidement récoltée pour ne pas entrer en compétition avec la seconde (Tanveer et al. 2017).

Peu développées en Europe par rapport au reste du monde, les associations de cultures les plus fréquentes en grande culture concernent les céréales et les légumineuses.

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

De nombreuses études montrent que les associations de cultures réduisent l'incidence des bio-agresseurs par rapport aux cultures seules. Or peu d'entre elles quantifient leur potentiel de réduction de l'usage de pesticides (Lopes et al. 2016).

Une réduction de l'Indice de Fréquence des Traitements (IFT) comprise entre 21 et 26% est observée pour un mélange pois-blé par rapport aux cultures seules, avec ou sans fertilisation azotée (Pelzer et al. 2012). Une réduction similaire a été observée auprès d'agriculteurs ayant diversifié leurs rotations et introduit des systèmes d'associations de cultures (Cadoux et al. 2019). Une exploitation qui a réalisé la même démarche a pu réduire son IFT de 50% en huit ans (Viguié and Hellou 2019).

Concernant la gestion des adventices, lorsque que la somme des densités des cultures associées est supérieure à 170% par rapport aux densités des cultures seules, certains agriculteurs estiment qu'il n'y a plus besoin de désherber les mélanges de légumineuses et de céréales. Si les variétés sont peu couvrantes, jusqu'à deux traitements peuvent avoir lieu. La Figure 2 illustre les résultats d'une enquête sur la gestion des adventices lors d'association de culture auprès de 37 agriculteurs (Lamé et al. 2015).

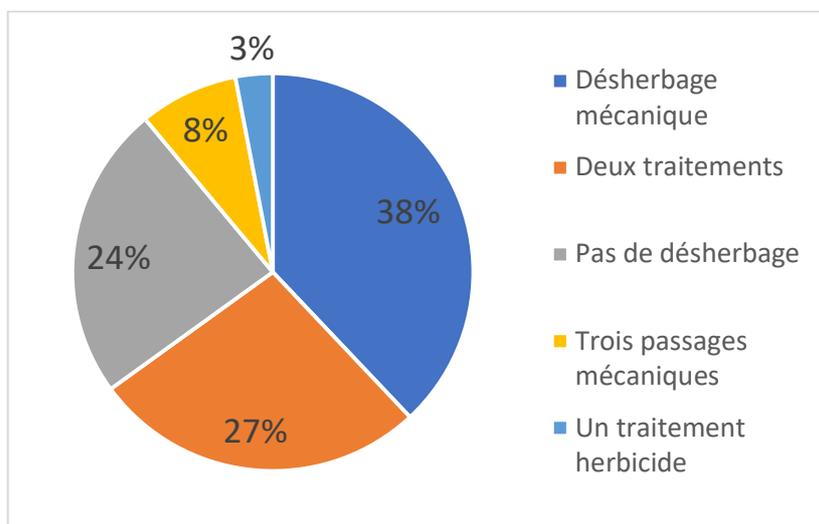


Figure 2 - Gestion des adventices lors d'associations de cultures (Lamé et al. 2015)

Engrais

La présence de légumineuses augmente le taux d'azote disponible pour les cultures associées. Elles peuvent contribuer jusqu'à 15% des apports azotés lors d'associations avec des céréales (Stagnari et al. 2017). Une revue de 132 études sur les associations de cultures indique qu'elles permettent d'économiser entre 19 et 36% d'engrais par rapport aux monocultures avec la même gestion (Li et al. 2020). D'après une analyse sur 9 sites différents, une association céréales-légumineuses nécessite en moyenne moitié moins d'apports azotés (60kg N/ha) que les cultures de blé seules (140kg N/ha). Dans de telles conditions de fertilisation, l'efficacité des engrais appliqués par tonne de grains produits est 2,5 fois plus élevée pour une association blé-légumineuses que pour un blé seul (Pelzer et al. 2012).

La fertilisation azotée augmente la compétitivité et le développement des céréales (Pelzer et al. 2012; Ghaley et al. 2005)). Le développement des légumineuses et leur capacité de fixation biologique de l'azote sont inhibés, supprimant ainsi l'intérêt des associations les contenant (Stagnari et al. 2017; Ghaley et al. 2005). La sélection de légumineuses parvenant à maintenir leur capacité de fixation biologique de l'azote en cas d'augmentation de l'azote minéral du sol est cruciale lors de l'adoption de ce type d'association (Stagnari et al. 2017).

La présence de légumineuses dans une association augmente le taux d'azote dans le sol après la récolte (Tanveer et al. 2017; Pelzer et al. 2012). Ce taux est d'autant plus élevé en l'absence de fertilisation azotée, comme le montre le Tableau 4.

Tableau 4 - Quantité d'azote minéral dans le sol après la récolte (Pelzer et al. 2012)

Culture	Fertilisation azotée	Azote minéral dans le sol après la récolte (kg N/ha)
Blé seul	Non	39,9
	Oui	47
Association blé-pois	Oui	41
Association blé-pois	Non	52,1
Pois	Non	67

Eau

Une revue de 132 études sur les associations de cultures relève une augmentation de la consommation d'eau liée à l'allongement de la période de culture par rapport aux cultures seules. L'effet des associations de cultures sur la consommation d'eau est très peu documenté. Un travail de quantification de cet effet doit être réalisé au niveau mondial (Li et al. 2020).

Effets sur le rendement

58 études de terrain réalisées en Europe dans des conditions pédoclimatiques contrastées montrent que les cultures associées augmentent le rendement jusqu'à 19% (Laurent Bedoussac et al. 2015). Le rendement d'un maïs suivant une culture relais de blé et de légumineuses augmente de 30% (Tanveer et al. 2017). Le gain de rendement est d'en moyenne de 2,1 T/ha si l'association inclut une culture de maïs. Sans culture de maïs, il est d'en moyenne 0,5 T/ha (Li et al. 2020).

La concentration en protéines des mélanges légumineuses-céréales fertilisés ou non est d'en moyenne 11%, soit supérieure à un blé non fertilisé (9,4%). Elle reste en moyenne inférieure à un blé fertilisé (12%) (Pelzer et al. 2012) mais peut atteindre jusqu'à 14% (Laurent Bedoussac 2009). La teneur en azote des parties aériennes d'un maïs suivant une culture relais de blé et de légumineuses est 55% supérieure au témoin (Tanveer et al. 2017).

Les associations de cultures permettent de produire plus sur de petites surfaces. Le « land equivalent ratio » LER permet de mesurer la surface relative requise pour produire en culture pure un rendement égal à celui obtenu par les cultures associées. Il est égal à 1,3 en moyenne (Himanen et al. 2016; Laurent Bedoussac et al. 2015; Laurent Bedoussac 2009; Ghaley et al. 2005). Les cultures associées réduisent l'occupation des terres agricoles de 16 à 29% par rapport à des monocultures (Li et al. 2020).

Effets sur le temps de travail

L'impact des associations de cultures sur le temps de travail varie selon le type de configuration mis en place. Elle peut entraîner une augmentation du nombre de passage d'engins pour les cultures en bandes, en rangs ou les cultures relais. Une augmentation de 15% de la charge de travail peut avoir lieu (Viguié and Hellou 2019). Si les espèces sont cultivées en mélange, le tri

du grain peut s'avérer chronophage. A l'inverse, si elles sont bien maîtrisées, les cultures associées peuvent alléger le programme phytosanitaire et l'épandage des engrais ce qui réduit de la charge de travail (Guyomard et al. 2013; Himanen et al. 2016).

Effets sur le coût de production

Malgré la réduction de consommation d'intrants, le coût de production des associations de cultures reste élevé à cause des opérations spécifiques qui peuvent avoir lieu. Un semis supplémentaire coûte 40€/ha/passage, une récolte 80€/ha et le tri des graines 15 à 30€/T de graines (Laurent Bedoussac et al. 2015; Mamine and Farès 2020).

La rentabilité des cultures associées est augmentée et stabilisée par rapport aux cultures seules (Laurent Bedoussac et al. 2015; Mamine and Farès 2020; Pelzer et al. 2012). Si on considère le produit de la vente, les aides PAC, les charges opérationnelles et matérielles, les cultures associées sont plus intéressantes que les cultures pures qu'il y ait ou non un apport d'engrais organique ou une étape de tri sur l'exploitation. Il serait même plus rentable de cultiver deux hectares de cultures associées qu'un hectare de blé et un hectare de légumineuses (L. Bedoussac et al. 2011).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Cadoux et al. observent une réduction des émissions de GES de 24% lorsque les rotations sont diversifiées et que des associations de cultures sont mises en place (Cadoux et al. 2019).

Une réduction de 31% des flux de N₂O est observée en associant des fèves à du blé, par rapport à un blé ayant reçu des apports d'azote. Différents facteurs comme le taux d'azote appliqué, le taux de Carbone Organique du Sol (COS), le pH et la texture du sol influencent les quantités de N₂O émises (Stagnari et al. 2017).

Jusqu'à un tiers des émissions de CO₂ indirectes liées à l'utilisation d'engrais sont évitées avec la réduction du recours aux engrais de synthèse. D'après Stagnari et al. (2017), 2,6 à 3,7 kg de CO₂ sont générés par kg d'engrais azoté synthétisé. Si on considère que les associations de cultures permettent d'éviter 50 kg N/ha, une réduction de 130 à 185 kg eCO₂/ha a lieu. Une augmentation des émissions de CO₂ directes liées à la consommation de carburant peut être observée si les associations de cultures nécessitent plusieurs passages de tracteurs lors des semis et des récoltes.

Selon Laurent Bedoussac (2009) la performance des associations de cultures est amoindrie lors d'un apport d'azote car le blé étouffe les légumineuses. Une atténuation des émissions de NH₃ (d'ammoniac) a également lieu, mais elle est non quantifiée.

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Les cultures associées améliorent la qualité du sol, son activité biologique, son contenu en COS, sa fertilité, sa structure et sa perméabilité. Les phénomènes de ruissellement et d'érosion sont ainsi limités (Chenu et al. 2014; Stagnari et al. 2017). Ces effets sont discutés si le nombre de

passages d'engins agricoles augmente. L'insertion de légumineuses en tant que culture associée permet de réduire les pollutions liées à la lixiviation des nutriments. Certains considèrent que cette réduction est plus efficace que celle assurée par les cultures dérobées et les jachères (SoCo Project Team 2009). Pour finir, elles favorisent la biodiversité -récoltée ou non, et augmentent l'autosuffisance en protéines et en nutriments des exploitations (SoCo Project Team 2009; Eglin and Trévisiol 2015; Himanen et al. 2016).

b. Remarques

Le manque de connaissances sur les caractéristiques des variétés, les densités à semer et la période de récolte peuvent freiner les agriculteurs à les mettre en place. Il en est de même pour la maîtrise que demande cette technique pour réduire la pression des adventices tout en maintenant les rendements. La faible commercialisation de mélanges d'espèces, le manque de règles d'échange entre les exploitations et la peur de ne plus pouvoir utiliser les variétés de ferme sont d'autres éléments soulevés (Himanen et al. 2016).

La valeur marchande associée à ces cultures pose problème. Elles se sont avérées jusqu'alors peu compétitives par rapport aux importations de tourteaux de colza pour l'alimentation animale (Cholez and Magrini 2014). De façon générale, la filière en aval demande généralement des produits purs et standardisés (Stagnari et al. 2017). Cela limite les cultures mélangées aux marchés de niche ou ajoute une étape de tri au niveau de l'exploitation, lorsque les espèces choisies le permettent (Himanen et al. 2016). Ce tri induit une augmentation du temps de travail et n'est pas toujours efficace car il peut laisser un taux d'impureté élevé (15%). Un second tri serait nécessaire pour destiner la production à l'alimentation humaine, ce qui représente un coût élevé (L. Bedoussac et al. 2011).

c. Bilan

Les associations de cultures montrent des résultats intéressants en termes de réduction d'engrais et de pesticides. Une augmentation de la consommation d'eau est constatée mais non quantifiée. La charge de travail est plus importante qu'en monoculture, mais la réduction des opérations de traitements phytosanitaires contre parfois ce constat. Les associations de cultures ont un coût de production plus important qu'en monoculture. Ce coût de production est contrebalancé par un rendement élevé rendant ainsi la marge brute supérieure à celles des cultures seules. Les émissions de GES sont réduites. Les cultures associées sont bénéfiques pour la qualité de l'eau et pour la biodiversité. Leur effets sur la qualité du sol dépendent de leur gestion, notamment du nombre de passages d'engins agricoles. Peu reconnues en Europe par rapport au reste du monde, leur développement nécessiterait une adaptation de la filière tant en amont qu'en aval.

2. Gestion de l'interculture

a. Cultures intermédiaires

Le terme « culture intermédiaire » ou « Mulch vivant » considère ici l'ensemble des cultures implantées durant la période d'interculture. Elles peuvent être cultivées pour les services écosystémiques non marchands qu'elles fournissent ou pour exporter et revaloriser leur biomasse. Récoltée ou non, une partie de leur biomasse est enfouie ou laissée sur le sol avant

le semi de la culture suivante. Les cultures intermédiaires peuvent être implantées dans des buts spécifiques comme les CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate) ou les CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique) ou non (Ceschia et al. 2017). Le terme de culture intermédiaire ne concerne pas les cultures relais, débordant sur les cultures précédentes ou suivantes.

La durée moyenne des périodes d'interculture est de 6 mois en Europe, variant de 5 mois dans le Nord-Est, aux environs de la mer Baltique, à 9 mois dans le Sud-Ouest, en Espagne. Les cultures intermédiaires sont généralement implantées en septembre après une culture d'hiver récoltée en août, pour des durées supérieures à 3 mois (Carrer et al. 2018).

Certaines espèces implantées durant l'interculture peuvent impacter la croissance des cultures principales. C'est notamment le cas du raygrass qui inhibe de 34% la croissance racinaire de la culture suivante si une durée d'au moins deux semaines n'est pas respectée entre la culture intermédiaire et la culture qui la suit (Trezzi et al. 2016). Le choix du couvert, le moment de son implantation et de sa destruction sont à raisonner à l'échelle de la rotation, en fonction de la culture précédente et de la culture suivante (Eric Justes and Richard 2017).

Une culture intermédiaire peut être détruite naturellement s'il gèle suffisamment en hiver, évitant de recourir aux herbicides. Une autre alternative aux herbicides est de les détruire par action mécanique (Guyomard et al. 2013; Eric Justes and Richard 2017). Il est parfois difficile de se passer d'herbicides. C'est notamment le cas en Techniques Culturelles Simplifiées (TCS) si le gel n'est pas suffisant.

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

L'implantation de cultures intermédiaires régule les bio-agresseurs qui sont présents durant la période d'interculture, et dans la culture suivante. Certaines espèces de céréales, de polygonacées et de brassicacées sécrètent des substances allélopathiques. Parmi ces espèces peuvent être citées le seigle, le blé d'hiver, l'orge, l'avoine, le riz, le sorgho, la luzerne, le sarrasin, la moutarde, le radis, le colza et les tournesols (Jabran et al. 2015; Koehler-Cole et al. 2020). Ces molécules allélopathiques sont, une fois dans le sol, des principes actifs régulant la germination et la croissance de certaines adventices. Elles impactent également le développement de ravageurs comme des nématodes, ou de maladies causées par des champignons et bactéries (Eric Justes and Richard 2017; Guyomard et al. 2013; M. Farooq et al. 2013).

Ces cultures intermédiaires entrent en compétition avec les adventices pour les ressources en lumière, en eau ou en nutriments. Elles concurrencent ainsi leur développement et leur croissance. Elles attirent et piègent ou empoisonnent les ravageurs, ou les répulsent, réduisant leur présence sur les cultures suivantes (Eric Justes and Richard 2017; Couëdel et al. 2017; Cordeau and Moreau 2017). L'effet des cultures intermédiaires dépend du type de cultures

intercalaires implantées, de leur agencement (type de mélange) et de leur densité (Cordeau and Moreau 2017).

De nombreuses études reportent une réduction du nombre d'adventices durant l'interculture grâce aux cultures intermédiaires. L'incidence et la sévérité des maladies sont également réduites sur la culture suivante, comme le montrent les Tableau 5 et Tableau 6. Plusieurs études mentionnent l'efficacité des brassicacées contre les nématodes (Couëdel et al. 2017; E Justes et al. 2012; Eric Justes and Richard 2017), mais peu d'études quantifient cet effet.

La période de fin août à mi-novembre correspond à une période de traitement herbicide et à l'implantation des cultures intermédiaires (Lazartigues 2010). Les mois de mai et juin correspondent à une période de traitement fongicide sur les cultures précédant l'interculture (Lazartigues 2010). Aucune étude n'a quantifié la réduction de l'usage de ces pesticides.

Tableau 5 - Efficacité des cultures intermédiaires contre les adventices

Culture intermédiaire	Mesure de	Effet	Comparaison à	Source
Verse velue et avoine	La banque de graines des adventices	- 30% à - 70%		(Jabran et al. 2015)
Brassicacées (colza)	La biomasse des adventices	- 85% à -96%	Un sol nu en interculture	(Couëdel et al. 2017)
Brassicacées (colza, moutarde brune ou moutarde blanche)	La biomasse total d'adventices	- 49%	Six semaines après l'émergence des couverts par rapport à avant	(Couëdel et al. 2017)
Radis, avoine ou sarrasin	La biomasse des adventices	-28%		(Koehler-Cole et al. 2020)

Tableau 6 - Efficacité des cultures intermédiaires contre les maladies telluriques (Couëdel et al. 2017)

Culture intermédiaire	Culture suivante	Maladie	Effet sur la maladie	Effet sur le rendement	Comparaison à
Brassicacées	Tournesol	<i>Verticillum</i>	- 60%		Un sol nu avant implantation de la culture
Brassicacées (colza et moutarde brune)	Blé	<i>Piétrin échaudage</i>	- 70%	Augmentation	Une pâture
Brassicacées (moutarde brune)	Betterave	<i>Rhizoctonia solani</i>	- 45% de l'incidence - 7% de la sévérité	+ 13%	Un témoin sans moutarde
Brassicacées (colza)	Pomme de terre	<i>Rhizoctonia solani</i>	- 65% de l'incidence - 50% à -70% de la sévérité	+27%	
Brassicacées (moutarde blanche)	Pomme de terre	<i>Rhizoctonia solani</i>	- 45% de l'incidence - 47 % de la sévérité		
Brassicacées (moutarde brune)	Pomme de terre	<i>Rhizoctonia solani</i>	+ 35% de l'incidence + 17% de la sévérité		
Brassicacées (moutarde brune)	Blé	<i>Fusariose F. graminearum</i>	- 30 % de la sévérité		
Brassicacées (colza)	Blé	<i>Fusariose F. graminearum</i>	- 45% de la sévérité		
Brassicacées (chou)	Pomme de terre	<i>Streptomyces scabies</i>	-90% de l'incidence		

Certaines espèces implantées en culture intermédiaire peuvent être hôtes de pathogènes et favoriser leur présence. Une attention doit être portée sur les champignons présents dans la parcelle ou pour lesquels la culture suivante serait sensible, afin de ne pas choisir une culture intermédiaire qui favoriserait leur établissement. Les brassicacées sont, par exemple, des hôtes de champignons causant la fusariose. Le navet et la roquette peuvent être utilisés en culture intermédiaire mais sont sensibles aux nématodes à galles (Couëdel et al. 2017).

Certaines études préconisent d'appliquer une demi-dose d'herbicide à la suite d'une culture intermédiaire, avant d'implanter une culture de rente comme un maïs, pour contrôler efficacement les adventices (Couëdel et al. 2017). Une telle gestion soulève la question du risque de résistance des adventices aux herbicides utilisés, s'ils sont appliqués en faible concentration.

Engrais

Si elles contiennent des légumineuses, les cultures intermédiaires peuvent emmagasiner jusqu'à 100 Unités Azotées (UA) par hectare (Eric Justes and Richard 2017). Cette quantité varie en fonction des espèces de légumineuses implantées, de leur proportion par rapport aux autres espèces si elles sont mélangées, des conditions pédoclimatiques et de la date de destruction. L'azote assimilé par les légumineuses provient de l'azote atmosphérique. Une culture intermédiaire de légumineuses ne capte et ne transforme pas autant d'azote minéral en azote organique que des graminées ou des brassicacées (Constantin et al. 2017).

Jusqu'à 50% de l'azote acquis par une culture intermédiaire est rendu disponible dans les 6 mois pour la culture suivante (Constantin et al. 2017). La partie engrais vert, page 109, détaille l'économie d'engrais pouvant être réalisée pour une culture suivant des légumineuses.

La date de destruction du couvert doit être raisonnée pour que la minéralisation de l'azote libéré concorde avec la période d'assimilation d'azote de la culture suivante. Sans quoi, un risque de lixiviation existe (Stagnari et al. 2017).

Eau

Les cultures intermédiaires modifient le bilan hydrique en augmentant l'évapotranspiration et l'infiltration de l'eau et en réduisant le ruissellement. Il n'y a généralement pas d'impact sur la réserve en eau disponible pour la culture suivante si les couverts sont détruits et enfouis un mois et demi avant son implantation (Carrer et al. 2018). En cas de faibles précipitations hivernales ou d'une destruction du couvert très tardive (mi-mars à mi-avril), une réduction d'environ 10% du drainage et donc du rechargement des nappes phréatiques pour la culture suivante est observée. Cette réduction peut atteindre 25% dans les cas extrêmes (Constantin et al. 2017).

Effets sur le rendement

L'effet des cultures intermédiaires sur le rendement de la culture suivante est mitigé. Les résultats présents dans le Tableau 6 montrent que la présence de cultures intermédiaires maintient voire augmente les rendements (Altieri et al. 2011). La synthèse de 106 études montre que les cultures intermédiaires tout type confondu réduisent d'en moyenne 4% les rendements de la culture suivante. Mais celles contenant un mélange légumineuses-non légumineuses augmentent en moyenne le rendement de la culture suivante de 13% (Abdalla et al. 2019). La partie engrais vert, page 109, montre une augmentation du rendement des cultures suivant des légumineuses.

L'effet des cultures intermédiaires sur la teneur en protéine de la culture suivante est très variable (Abdalla et al. 2019).

Effets sur le temps de travail

Une augmentation de 0,6h/ha à 2,2h/ha du temps de travail est observée, selon les pratiques mises en œuvre pour planter et détruire la culture intermédiaire. Cette augmentation est généralement supérieure à 1,5h/ha (Colnenne-David and Bamière 2013).

Effets sur le coût de production

Une augmentation de la consommation de carburant a lieu lors de la mise en place et la destruction du couvert. La durée de l'interculture, la méthode choisie pour mettre en place et détruire le couvert ainsi que le matériel utilisé font varier cette consommation (Labreuche and Deschamps 2016; Chambre d'Agriculture d'Isère 2017). Une étude menée par l'INRA estime le coût lié à l'implantation et à la destruction d'une culture intermédiaire entre 30€/ha et 150€/ha selon les techniques utilisées. Ces estimations tiennent compte de la consommation de carburant, de l'entretien du tracteur et du matériel. Le coût des semences varie entre 14 et 60€/ha (Colnenne-David and Bamière 2013). Le coût de la main d'œuvre varie de 9€/ha à 33€/ha, si le travail est réalisé par un salarié. Cette augmentation est généralement au-dessus de 22,5€/ha (Colnenne-David and Bamière 2013).

Une culture intermédiaire réalisée par repousse permet d'économiser du temps de travail, du carburant, des semences et l'entretien du matériel (Guyomard et al. 2013). Mais elle risque d'être moins efficace qu'une culture intermédiaire implantée.

Une culture de légumineuses réduit le coût de production de la culture suivante, grâce à une moindre utilisation d'engrais. Ces gains sont détaillés dans la partie sur les engrais verts.

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les cultures intermédiaires permettent de réduire le réchauffement climatique par des effets biogéochimiques en modifiant les émissions de GES ou en séquestrant du carbone (Carrer et al. 2018; Ceschia et al. 2017). Elles agissent également par des actions biophysiques sur le bilan énergétique et sur l'albédo, la façon dont l'énergie solaire est réfléchi à la surface de la terre. La somme des effets biogéochimiques et biophysiques liés à la présence d'une culture intermédiaire influence le forçage radiatif par rapport à un sol nu (Ceschia et al. 2017).

Effet biogéochimiques

Les émissions de N₂O liées aux processus de nitrification/dénitrification dans les cultures intermédiaires sont d'environ 6 kg de eCO₂/ha/an. Les GES émis lors des opérations techniques de semi et de destruction de ces cultures représentent moins de 30 kg de eCO₂/ha/an (Ceschia et al. 2017). La séquestration du carbone présentée Tableau 7 est donc bien supérieure aux émissions de GES imputables aux cultures intermédiaires. Le bilan des GES lié aux propriétés biogéochimiques de ces cultures est donc positif par rapport à un sol nu. D'autres études moins récentes estiment ces émissions à la hausse : selon Chenu et al. (2014), les émissions de GES sont de l'ordre de 522 à 1 305 kg de eCO₂/ha/an.

Tableau 7 - Capacité de stockage de carbone par les cultures intermédiaires

Stockage de carbone (kg de eCO ₂ /ha/an)	Spécificité	Régions étudiées	Source
1 160	Sans légumineuses	Pennsylvanie (USA) et Espagne	(Kaye and Quemada 2017)
1 350	En présence de légumineuses	Pennsylvanie (USA) et Espagne	(Kaye and Quemada 2017)
1 100		37 localisations différentes	(Poeplau and Don 2015)
865 à 1 380			(Ceschia et al. 2017)
1 000	Sans légumineuses	46 essais dans le monde	(E Justes et al. 2012)
477 à 1 360			(Chenu et al. 2014)

Bien que la capacité de séquestration soit plus reliée à la biomasse produite qu'à la nature des cultures intermédiaires, quelques études montrent que le stockage de carbone s'accroît en présence de légumineuses (Ceschia et al. 2017).

Effets biophysiques

Les cultures intermédiaires augmentent la majeure partie du temps l'albédo des parcelles par rapport à un sol nu. Une augmentation d'albédo a un effet refroidissant sur le climat ce qui peut être assimilé à un piégeage équivalent de CO₂ atmosphérique. Le Tableau 8 compile des résultats du piégeage équivalent de CO₂ atmosphérique issus de l'augmentation de l'albédo par la présence de cultures intermédiaires lors des périodes d'interculture.

Tableau 8 - Piégeage équivalent de CO₂ atmosphérique par l'albédo des cultures intermédiaires par rapport à un sol nu (Carrer et al. 2018)

Piégeage équivalent de CO ₂ atmosphérique (kg eCO ₂ /ha/an) sur un horizon de 100 ans.	Durée des cultures intermédiaires	Spécificité	Régions étudiées
159	3 mois		Europe
201,93	Plus de 3 mois		Europe
114,48	3 mois	Sans irrigation	Europe
120 à 460			Pennsylvanie (USA) et Espagne

L'albédo varie selon les endroits, la géographie, la couleur du sol, les modalités d'implantation de la culture de couverture (durée, densité, type de semi), le choix des espèces et le stade de développement. Les sols clairs peuvent parfois avoir un albédo supérieur aux cultures intermédiaires. La présence de cultures intermédiaires plutôt que de laisser le sol nu lors de la période d'interculture sur de telles parcelles causerait un réchauffement réduisant donc le piégeage équivalent de CO₂ atmosphérique. Cette réduction reste néanmoins inférieure à l'effet des cultures intermédiaires sur le stockage de carbone et n'en compenserait qu'une partie (Ceschia et al. 2017). La disponibilité en eau est un autre facteur réduisant l'albédo des cultures intermédiaires. Une réduction de 28% de l'albédo des cultures intermédiaires par rapport à un sol nu peut avoir lieu en situation de stress hydrique (Ceschia et al. 2017).

D'après Carrer et al. (2018), en cumulant l'effet de l'albédo des cultures intermédiaires et leur capacités de séquestration de carbone, les GES peuvent être réduits à raison de 1 500 kg de eCO₂/ha/an.

Les cultures intermédiaires ont d'autres effets sur les propriétés biophysiques des parcelles. Elles contribuent à réduire la température de surface et les flux de chaleur au profit des flux d'évapotranspiration, ce qui tend à refroidir également le climat. Ces phénomènes sont supposés être de même ordre de grandeur que les effets de refroidissement de l'albédo (Ceschia et al. 2017). L'impact sur le climat des cultures intermédiaires implantées à grande échelle, comme les changements de nébulosité dus à leur évapotranspiration, est méconnu.

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Les cultures intermédiaires protègent les sols contre l'érosion hydrique, le ruissellement et la battance. Elles permettent d'améliorer leur état structural et de maintenir leur richesse en matière organique (Eric Justes and Richard 2017; Carrer et al. 2018; Guyomard et al. 2013). Leurs racines favorisent les propriétés hydriques du sol et les capacités de filtration de ce dernier.

L'assimilation et la restitution du couvert lorsqu'il n'est pas récolté assure le recyclage et le maintien des minéraux à la surface. Les crucifères et les graminées sont plus efficaces que les légumineuses pour immobiliser l'azote minéral. Cet azote ne sera pas lixivié, améliorant ainsi la qualité de l'eau. La destruction du couvert entraîne la libération des minéraux et la minéralisation de l'azote. En absence de fertilisation azotée, le bilan de l'immobilisation et de la restitution des éléments azotés du sol est nul (Constantin et al. 2017; Carrer et al. 2018; Guyomard et al. 2013).

Ces cultures servent de refuge pour les oiseaux, pour la faune et la biodiversité du sol (Eric Justes and Richard 2017; Carrer et al. 2018). Dans une exploitation en polyculture élevage, elles pourraient participer à l'autonomie fourragère du troupeau, en fonction des espèces choisies.

ii. Remarques

Les conséquences des effets allélopathiques sur la réduction des symbioses avec des champignons auxiliaires et sur la croissance de la culture suivante sont débattus (Couëdel et al. 2017; Trezzi et al. 2016). Selon Trezzi et al. (2016), les effets allélopathiques dépendent des exsudats des variétés plantées en culture intermédiaire et de la sensibilité de la culture suivante (Koehler-Cole et al. 2020). (Altieri et al. 2011) affirme au contraire qu'une augmentation de la biomasse aérienne et de la germination des graines de la culture suivante est observée.

L'ensemble des bénéfices mentionnés ci-dessus ne sont valables que si la culture intermédiaire est une culture différente des cultures précédente et suivante. Une culture identique à la culture principale mais dont le débouché diffère, comme une CIVE, aura un effet inverse sur :

- L'incidence des bio-agresseurs ;
- La réduction du recours aux engrais azotés ;
- Le rechargement de la réserve en eau ;
- L'amélioration de la structure du sol.

iii. Bilan

Les cultures intermédiaires réduisent l'incidence des bio-agresseurs mais la réduction des pesticides n'est pas quantifiée. Si elles contiennent des légumineuses, un moindre recours aux engrais azotés pour les cultures suivantes peut avoir lieu. Elles réduisent les émissions de eCO₂. Les cultures intermédiaires assurent le recyclage des nutriments. Elles améliorent la structure du sol, la qualité de l'eau et la biodiversité. Le temps de travail et le coût de production augmentent, d'autant plus si la biomasse des cultures intermédiaires n'est pas récoltée. Les effets des cultures intermédiaires sur le rendement de la culture suivante varie selon les espèces qu'elles contiennent.

Des effets indésirables sur les cultures suivantes peuvent avoir lieu. Pour en minimiser l'apparition et profiter des bénéfices des cultures intermédiaires, le choix des espèces, de leur mélange, et de l'itinéraire technique (date de semi et de destruction) est à réaliser avec soin. Les cultures précédentes et suivantes, le contexte géo-pédologique et climatique de la parcelle, le nombre de jours où les pratiques peuvent être réalisées sont tout autant d'éléments à prendre en considération lors de l'insertion de cultures intermédiaires dans la rotation (Guyomard et al. 2013).

b. Faux semis

Le faux-semis est pratiqué depuis la nuit des temps. Le but est de réduire le stock de graines d'adventices en effectuant des travaux superficiels du sol répétés à moins de 5 cm. Il s'agit d'augmenter la levée des adventices pour les détruire avant de semer la culture suivante afin limiter leur développement lors de celle-ci (Moureaux 2020; Matthieu Hirschy 2020). Cette pratique fait partie des techniques sans labour (TSL) qui sont détaillées dans la partie sur le travail du sol, page 52. Elle peut aussi être réalisée à la suite d'un labour ou dans une rotation alternant régulièrement faux-semis et labour. Cette partie se concentre sur l'effet d'un faux-semis sur la gestion des adventices.

Effectuée une à trois fois, à deux ou trois semaines d'intervalle pendant l'interculture, le faux-semis s'avère efficace pour les adventices annuelles dont la dormance est peu prononcée, telles que les graminées, ou pour les repousses de la culture précédente. Il est déconseillé de réaliser des faux-semis en présence d'adventices vivaces car elles se multiplient par reproduction végétative. L'efficacité de cette pratique reste néanmoins dépendante des conditions climatiques (température et humidité du sol). Les conditions doivent être favorables à la levée des graines lors de l'intervention puis assurer le dessèchement des plantes les jours suivants pour éviter les risques de repiquage (Moureaux 2020; Matthieu Hirschy 2020).

Une préparation fine du sol favorise également la germination des adventices grâce à un bon contact graine/sol. Des outils tels que les herse de déchaumage, les bêches roulantes et les vibro-déchaumeurs sont privilégiés par rapport aux outils à disques qui sectionnent les rhizomes des adventices vivaces et les multiplient. Le Tableau 9 illustre l'efficacité de certains outils pour la destruction des adventices lors du faux-semi selon Arvalis et l'ITAB (Institut Technique de l'Agriculture Biologique) (Moureaux 2020; Matthieu Hirschy 2020).

Tableau 9 - Efficacité des faux-semis selon le type d'outil utilisé, (Arvalis, ITAB), tableau issu de (Matthieu Hirschy 2020)

Types d'outil	Profondeur de travail (cm)	Faux semis	Destruction des adventices annuelles
Cover-Crop (avec rouleau)	4-5	Assez bon	Bon
Déchaumage à disques indépendants	3-4	Bon	Assez bon
Néo-déchaumeur	4-5	Assez bon	Très bon
Outils à dents vibrantes (socs ou pattes d'oie)	4-5	Bon	Très bon
Herse de déchaumage	1-2	Assez bon	Faible

Cette pratique est généralisable pour toute les cultures. Elle correspond mieux aux terres limoneuses qu'argileuses où la préparation superficielle du sol démarre tôt. Néanmoins dans certains sols limoneux l'affinement et l'absence de mottes peuvent favoriser la formation de croûtes de battance (Moureaux 2020; Matthieu Hirschy 2020).

La période de réalisation du faux-semis dépend du type d'adventice ciblée, comme le montre le Tableau 10. Cette pratique est pleinement justifiée avant une culture d'été car elle réduit fortement les adventices dans la culture. Elle est aussi intéressante pour lutter contre les graminées en culture d'hiver, notamment s'il n'y a pas de labour (Matthieu Hirschy 2020).

Tableau 10 - Période de levée de quelques adventices après une récolte d'été, tableau issu de (Matthieu Hirschy 2020)

	Sitôt la moisson	Début septembre	Fin septembre Début octobre	Fin octobre
Repousses céréales				
Repousses colza				
Brome stérile				
Autres Bromes				
Ray-grass				
Géranium				
Vulpin				
Gaillet gratteron				
Agrostis				
Matricaires				
Véronique				
Pensées				

Le temps disponible pour la répétition des passages peut être un facteur limitant la mise en place de cette pratique. Il est influencé par la présence d'une culture intermédiaire, la culture précédente et la culture suivante (Matthieu Hirschy 2020).

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des pesticides

Gestion des adventices

Cette pratique cible les adventices annuelles à faible dormance. Elle a un effet faible voir inverse sur les adventices vivaces (Mischler and Pernel 2011b).

Des réductions du poids sec et de la densité des adventices allant de 30% à 95% sont observées (Matthieu Hirschy 2020; Kanatas et al. 2020; Mischler and Pernel 2011a). L'efficacité des faux-semis augmente avec le nombre de passages d'après (Matthieu Hirschy 2020). Elle est la plus faible pour les dicotylédones comme le montre le Tableau 11 (Kanatas et al. 2020; Mischler and Pernel 2011a).

Le faux-semis a une efficacité supérieure au semis direct sur la réduction des adventices. Il peut être couplé à un herbicide post-levée pour plus d'efficacité (Kanatas et al. 2020).

Tableau 11 - Efficacité du semi tardif par rapport à un semi à date normale (Compilation des résultats de 15 références, Lheureux et Mischlet, 2008), tableau issu de Mischler and Pernel (2011a)

Adventices concernées	Efficacité moyenne du retard de la date de semis sur la densité d'adventices (en moyenne le semi tardif a été réalisé 19 jours après le semis à date normale)
Toutes	-67%
Dicotylédones (gaillet, véroniques...°	-38%
Vulpin	-56%
Ray-grass	-68%
Brome stérile	-72%

Selon les espèces considérées, la diminution des densités d'adventices varie de -38 à -72% avec un semis tardif à l'automne. L'effet est plus marqué pour les adventices telles que le vulpin, le ray-grass ou le brome stérile grâce à leur pic de levée étroit.

Gestion des ravageurs

Les faux-semis pourraient favoriser la mouche du semi qui apprécie les sols fraîchement travaillés pour pondre mais elle permet de détruire les œufs de limaces (Moureaux 2020).

Effets sur le rendement

Un faux-semis peut entraîner un dessèchement du lit de semence et rendre nécessaire une irrigation pour la levée de la culture, surtout si les semences sont inférieures à 1 mm. Une dégradation du rendement peut aussi avoir lieu si la destruction des adventices levées lors du faux-semis n'est pas totale (Matthieu Hirschy 2020). Selon (Verschwele 2021) ce risque est également présent, notamment pour les cultures de printemps, si le faux-semis entraîne une réduction du temps de croissance végétative de la culture.

D'autres études montrent que cette pratique maintient voire améliore le rendement lorsqu'elle est couplée à un labour ou à un traitement post-émergence (Verschwele 2021; Kanatas et al. 2020). Elle permet d'augmenter les rendements de 22 à 32% par rapport à un semis direct. Cette augmentation peut atteindre 63% lorsque un traitement herbicide post-émergence est effectué après le faux-semis, par rapport à un semis direct suivi du même type de traitement (Kanatas et al. 2020).

Effets sur le temps de travail

La réalisation d'un faux-semi nécessite environ 30 minutes par hectare et par passage mais un gain de temps peut être perçu lors des autres opérations liées au désherbage (Van Dijk et al. 2018).

Effets sur le coût de production

L'augmentation du nombre de passages induit une augmentation de la consommation de carburant. Ce coût peut être compensé par l'absence d'un traitement herbicide (Matthieu Hirschy 2020). La réalisation de faux-semis peut entraîner une augmentation du parc matériel d'une exploitation, ce qui a aussi un coût (Matthieu Hirschy 2020).

Le Tableau 12 montre que deux ou trois déchaumages coûtent moins chers qu'un déchaumage suivi d'un traitement herbicide avant le semi. Bien que plus économique, la stratégie 1 n'est pas conseillée car sans labour le risque de repiquage des adventices est accru et risquerait de faire chuter le rendement et donc la marge brute (Mischler and Pernel 2011b).

Tableau 12 - Coûts de différentes stratégies de faux-semis, tableau issu de (Mischler and Pernel 2011b)

Stratégie	Interculture				Blé				
	Déchaumage mi-août (€/ha)	Déchaumage début sept (€/ha)	Déchaumage fin sept (€/ha)	Glyphosate début octobre (€/ha) ¹	Semis précoce (€/ha) ²	Semis tardif (€/ha) ³	Désherbage fin oct ⁴ + insecticide d'automne (€/ha) ⁵	Houe rotative fin oct (€/ha)	Coût total de la stratégie (€/ha)
1	8,9				38,2		19,6		66,7
2	8,9			16,4	38,2		19,6		83,1
3	8,9	8,9			38,2			12,1	68,8
4	8,9	8,9				42,8			60,5
5	8,9	8,9	8,9			42,8			69,4
La simulation économique ci-dessus montre que contrairement à ce qui est attendu, une stratégie avec 3 déchaumages superficiels (et un semis tardif) coûte moins cher qu'une stratégie avec un déchaumage et un désherbage au glyphosate (en semis précoce). La stratégie n°1, avec uniquement un déchaumage et un semis précoce, semble difficilement tenable sans un labour (plus coûteux), en raison des risques de repiquage d'adventices.				Coût du passage = coût de la traction + coût de de la main d'œuvre, selon le barème d'entraide, matériel amorti sauf houe rotative ¹ 1,5 L de glyphosate/ha ² Semis au 01/10 à 140 gr/m2 avec un T2 ³ Semis au 01/10 à 140 gr/m2 avec un T2 ⁴ 2 L d'isporoturon + 0,2 L de First/ha ⁵ 0,2 L de cyperméthrine/ha					

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Bien qu'un faux-semis nécessite moins d'énergie qu'un travail du sol profond, une augmentation de la consommation de carburant est observée et varie selon le nombre de passages. Comme pour le coût de production, cette augmentation peut être contrebalancée par une réduction de la consommation d'herbicides. Une augmentation des émissions de N₂O liée au faux-semis est également induite, mais elle est très peu étudiée. Elle doit être de même ordre de grandeur que les émissions observées en TCS, décrites dans la partie sur le travail du sol, page 52.

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Une réduction de la quantité du stock semencier d'adventices permet de réduire les quantités d'herbicides utilisées. Si les quantités d'herbicides sont adaptées à la pression des adventices, les risques de transferts vers les eaux de surface et souterraines ainsi que vers l'air sont réduites. Peu d'informations sont disponibles quant à l'impact des faux-semis sur la biodiversité fonctionnelle. Le passage des outils risque cependant de perturber la macrofaune et la microfaune présentes en surface. Le sol reste nu lors de la mise en place de cette pratique. Des risques de tassement et de formation de croûtes de battances peuvent avoir lieu lorsqu'un faux-semis est réalisé en conditions trop humides ou sur des terres très limoneuses (Matthieu Hirschy 2020).

ii. Remarques

Un faux-semis ne permet pas toujours de se passer d'herbicides. En conditions humides, le recours au glyphosate peut être nécessaire, surtout si le laps de temps entre la destruction du faux-semis et le semis de la culture suivante est court. Bien que le décalage de la date de semis facilite l'efficacité d'un faux-semis, ce décalage n'est pas systématique et dépend du choix des agriculteurs (Moureaux 2020).

Cette pratique n'est pas associable avec les autres pratiques effectuées et les exigences demandées aux agriculteurs. L'obligation d'implanter des cultures intermédiaires, par exemple, réduit la possibilité de faire des faux-semis (Matthieu Hirsch 2020). À l'inverse, elle apparaît comme une pratique assurant une gestion efficace des adventices lorsqu'elle est couplée à l'association blé-sorgho (Shahzad et al. 2021). Pouvant favoriser la prolifération d'adventices vivaces, elle correspond mieux aux exploitations ayant une faible pression de ce type d'adventices (Verschwele 2021).

Un bon réglage du matériel permet de réduire la consommation du carburant et le temps de travail, qui sont deux points négatifs de cette pratique (Mischler and Pernel 2011b). Il est aussi possible de mutualiser l'achat de matériel afin de réduire les investissements qui lui sont liés (trois à sept outils sont recommandés) et d'avoir la possibilité de choisir l'outil le plus adapté aux conditions (Moureaux 2020).

iii. Bilan

La réalisation d'un faux-semis permet de réduire la pression des adventices annuelles mais peut favoriser la multiplication des adventices vivaces. Il s'agit d'une pratique généralisable sur toutes les cultures. Bien qu'elle dépende des conditions climatiques, le choix de sa mise en place a lieu lors de la définition de la rotation. La gestion de l'interculture, le type de sol et les autres pratiques implémentées sont des facteurs importants à prendre en considération. Les outils à disposition pour réaliser un faux-semis conditionnent également sa mise en place.

Si elle permet de réduire le nombre de traitements herbicides, elle ne permet pas toujours de s'en passer totalement. Elle peut même être plus efficace couplée à un traitement herbicide post-émergence. Le temps de travail et le coût de production augmentent avec le nombre de répétitions effectuées dans les parcelles et avec l'achat de matériel spécifique. Cette augmentation peut être potentiellement contrebalancée par une réduction du nombre de traitements phytosanitaires. La consommation d'énergie suit la même tendance. L'effet des résidus de culture sur le rendement est contrasté et semble très lié au climat. L'augmentation du travail du sol peut entraîner une augmentation des émissions de GES. Cette pratique peut augmenter la formation de croûtes de battance et avoir des externalités négatives sur la faune. À l'inverse, elle permet de réduire la pollution de l'air, du sol et de l'eau si les traitements phytosanitaires sont réduits.

c. Les résidus de culture

Suite à la récolte, les résidus peuvent être restitués au sol durant la période d'interculture. Les principaux objectifs sont de réduire le développement des adventices, de lutter contre le développement des ravageurs et des maladies. Cette pratique est aussi mise en place pour améliorer les rendements de la culture suivante, notamment pour un blé ou un maïs (Nichols et al. 2015).

Les pailles et les chaumes des céréales, de maïs et de soja sont broyées, mélangées et réparties de façon homogène sur la parcelle pour être plus facilement dégradées par les micro-organismes du sol lors d'un déchaumage. Elles peuvent aussi être laissées à la surface. Cette succession broyage et incorporation par un travail du sol superficiel est communément appelée mulching (Nichols et al. 2015; Labreuche and Deschamps 2016). Cette partie traite des résidus de culture broyés et enfouis, aussi appelé mulch. Elle ne concerne pas les mulchs vivants qui correspondent à une couverture du sol par des plantes qui sont traités dans la partie culture intermédiaire.

Cette revalorisation des résidus n'est pas adaptée pour certaines cultures comme le maïs ensilage, les cultures de fibres comme le lin ou les pommes de terre. Il est néanmoins possible d'épandre des résidus provenant d'autres cultures après la plantation, après les premiers désherbages mécaniques ou après le buttages des pommes de terres (Blaszczyk 2020). Ces alternatives restent néanmoins peu communes sur ce genre de culture. L'application d'une quantité suffisante de résidus, de 10 tonnes par hectare environ, est nécessaire pour que ce soit efficace (Blaszczyk 2020).

Cette pratique demande de la technicité pour briser les résidus et les répartir sur une épaisseur inférieure à 5 cm en favorisant un contact étroit avec le sol et les micro-organismes. La profondeur varie selon le type d'outil utilisé (Nichols et al. 2015). De multiples broyages peuvent favoriser ce contact, mais ils ne sont pas toujours réalisables en fonction de la durée de l'interculture. La culture suivante peut être directement semée dessus, en semis direct ou un travail du sol peut être réalisé entre les deux.

Les résidus vont induire des changements physiques et chimiques à la surface du sol en influençant la température, l'humidité, la luminosité et la composition du sol. Leurs effets dépendent des conditions environnementales, du type de sol, du ratio C/N des résidus et des composés chimiques qu'ils dégagent (Nichols et al. 2015).

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

Gestion des adventices

Les résidus de culture régulent la présence des adventices en réduisant la température et l'humidité et en augmentant l'humidité du sol. Les résidus de certaines cultures sécrètent des substances allélopathiques qui inhibent la croissance des adventices et plus particulièrement des petites graines (Jabran et al. 2015; Nichols et al. 2015). La présence de résidus de culture crée des habitats pour la faune granivores. Néanmoins, l'efficacité de cette pratique sur la gestion des adventices ne fait pas l'unanimité (Nichols et al. 2015).

Tous ces effets sont très dépendants des adventices présentes, du type de résidus et de l'environnement de la parcelle, tant au niveau du contexte climatique qu'au niveau des prédateurs natifs. A titre d'exemple, dans les zones humides les résidus de culture limitent la germination des petites graines (Machet et al. 2018). Tandis que dans des zones sèches, l'augmentation de l'humidité favorise le développement des adventices (Nichols et al. 2015).

Comme l'illustre le Tableau 13 l'effet des résidus de culture sur la réduction des adventices est très variable, allant de 0 à 95%. Ce pourcentage maximum correspondant au résultat obtenu en désherbage mécanique. La gestion des adventices est considérée comme efficace si leur réduction est supérieure à 80%.

La décomposition dans le temps des résidus de culture laisse apparaître de nouvelles adventices. Cela peut également expliquer l'impact moyen et variable des résidus de culture sur les adventices (Van Dijk et al. 2018).

Tableau 13 - Effets des résidus de culture sur les adventices

Résidus de	Réalisé dans une culture de	Éléments évalués	Réduction obtenue	Source
Seigle	Maïs	Densité d'adventices monocotylédones	61%	(Gavazzi et al. 2010)
Seigle	Maïs	Densité d'adventices dicotylédones	96%	(Gavazzi et al. 2010)
Crucifères		Densité de Digitaires sanguines	79%	(Couëdel et al. 2017) 3 semaines après l'incorporation
Crucifères		Densité de l'Amaranthe de Palmer	48%	(Couëdel et al. 2017) 3 semaines après l'incorporation
Cinq crucifères		Germination de <i>Sesbania Herbacea</i>	95%	(Couëdel et al. 2017)
Combinaison tournesol, colza, sorgho	Maïs	Densité et la biomasse de pourpier et de souchet rond	90% environ	(Jabran et al. 2015)
Sorgho	Blé	Biomasse de Phalaris mineure et d'Ansérine blanche	48% – 56%	(M. Farooq et al. 2013)
Combinaison d'orge, de triticale et de seigle	Maïs	Émergence de <i>S. verticillata</i>	0-67%	(Jabran et al. 2015)
Combinaison d'orge, de triticale et de seigle	Maïs	Émergence de la panic des marais	27-80%	(Jabran et al. 2015)
Combinaison de tournesol, de riz et de crucifères	Maïs	Biomasse de pourpier	60%	(M. Farooq et al. 2013)
Paille de riz	Pommes de terre		90%	(Błaszczuk 2020)
Paille de blé	Pommes de terre		84%	(Błaszczuk 2020)
Paille de colza	Pommes de terre		79%	(Błaszczuk 2020)

Gestion des ravageurs

Cette pratique permet de lutter contre les larves des insectes foreurs tels que la sésamie ou la pyrale du maïs en les broyant puis en les exposant aux oiseaux et aux bactéries du sol. Elle a une efficacité limitée à l'échelle parcellaire et serait bien plus efficace si elle est réalisée au niveau du bassin versant, d'après Labreuche and Deschamps (2016). Le Tableau 14 montre l'efficacité de mulchs associés à d'autres pratiques sur la réduction du nombre de pyrales et de sésamies (Labreuche and Deschamps 2016).

Tableau 14 - Efficacité des mulchs associés à d'autres pratiques sur les insectes foreurs (Labreuche and Deschamps 2016)

Pratiques	Efficacité contre les foreurs
Broyage	50 à 75%
Broyage et travail superficiel du sol	75 à 85%
Broyage et dessouchage du collet	95%

Cette efficacité reste néanmoins mitigée voire contestée car une augmentation de la consommation de mollucides peut avoir lieu. Cette pratique peut également favoriser les dégâts de petits mammifères (Machet et al. 2018; Van Dijk et al. 2018).

Gestion des maladies

Les résidus de cultures altèrent la viabilité des spores des maladies fongiques en les enfouissant. Leur effet sur la réduction de l'incidence de maladies foliaires comme l'helminthosporiose du blé ou du maïs, la kabatiellose ont été relevés dans différentes études. Il en est de même pour les maladies fongiques comme la Fusariose, qui sont à l'origine de la production de mycotoxines dans les grains ou pour la bactérie *Streptomyces scabies*, responsable de la galle de la pomme de terre (Labreuche and Deschamps 2016; Couëdel et al. 2017). Le Tableau 15 présente quelques effets quantifiés des mulchs sur l'incidence de la fusariose et la présence de mycotoxines dans les grains de blé en Suisse (Drakopoulos et al. 2020).

Tableau 15 - Effets des mulchs sur l'incidence de la fusariose et la présence de mycotoxines dans les grains de blé en Suisse (Drakopoulos et al. 2020)

Mulch	Effet sur l'incidence de la maladie	Effet sur la présence de mycotoxines dans les grains
Moutarde blanche	- 32%	- 41%
Moutarde indienne	- 28%	- 45%
Trèfle d'Alexandrie	- 41%	- 50%

Cette efficacité reste néanmoins mitigée voire contestée car une augmentation du risque de maladies est accrue dans des zones humides, ce qui peut induire une augmentation de la consommation de fongicides (Jabran et al. 2015; Tanveer et al. 2017; Machet et al. 2018; Van Dijk et al. 2018).

Engrais

La composition des résidus de cultures influence les nutriments restitués dans le sol. Des résidus riches en carbone peuvent augmenter la consommation d'engrais azoté jusqu'à 20 UA. Les quantités des magnésium peuvent également augmenter, à l'inverse des quantités d'engrais phosphorés (Machet et al. 2018).

Si les résidus de culture sont riches en azote, ils permettent de piéger les mêmes quantités d'azote qu'un couvert en interculture, soit environ 20-30 kg N/ha. Un bon ratio C/N des tiges broyées favorise la minéralisation de l'azote (Labreuche and Deschamps 2016).

Une réduction des engrais azotés est possible, si les phases de minéralisation des résidus et d'absorption des cultures coïncident (Machet et al. 2018).

Eau

Les résidus réduisent la température du sol et augmentent l'humidité. Le mulching recommandé dans des conditions sèches pour réduire l'évapotranspiration et maintenir la disponibilité en eau (Blaszczyk 2020).

Effets sur le rendement

Du fait des effets mentionnés dans la partie Eau ci-dessus, les résidus de culture risquent de faire chuter le rendement et de ralentir la germination des cultures ou l'émergence des tubercules de pommes de terre dans un climat humide. Cela peut expliquer le peu de données disponibles provenant d'Europe du nord. Aucun effet significatif de l'incorporation des résidus sur les rendements n'a été perçu lors d'une étude de 8 ans en Belgique (Hiel et al. 2017).

Cette pratique est recommandée dans des conditions sèches où les rendements vont accroître grâce à la réduction de l'évapotranspiration et la disponibilité en eau (Blaszczyk 2020; Machet et al. 2018; Van Dijk et al. 2018; Nichols et al. 2015).

Le Tableau 16 présente des données obtenues en dehors de l'Europe car très peu de données européennes sur les mulchs sont disponibles. Cette pratique y est très souvent associée aux TCS et aux TSL, dont les effets sur le rendement sont présentés dans la partie travail du sol, page 55.

Tableau 16 - Effets des mulchs sur les rendements de la culture suivante

Mulch de	Culture	Effet sur le rendement	Source
Sorgho	Blé	+ 16 à 17%	(Muhammad Farooq et al. 2013)
Combinaison de sorgho, riz et crucifères	Maïs	+ 41%	(Muhammad Farooq et al. 2013)
Orge	Maïs	+ 45%	(Jabran et al. 2015)
Combinaison de tournesol, colza et sorgho	Maïs	+ 54%	(Jabran et al. 2015)

Effets sur le temps de travail

Selon le type de matériel utilisé et les pratiques usuelles de l'exploitation, la restitution des résidus de culture peut induire jusqu'à 1h de travail mécanique supplémentaire. Un déchaumage dure environ ½ h/ha et est généralement effectué de façon systématique. Un broyage dure en moyenne ½ h/ha. Une moissonneuse batteuse équipée d'un broyeur peut réaliser cette étape durant la récolte. Une augmentation du temps d'observation pour contrôler la présence des bio-agresseurs peut s'ajouter à ces charges de travail (Machet et al. 2018; Van Dijk et al. 2018).

Effets sur le coût de production

Le coût de la mécanisation varie entre 10€/ha par passage si le matériel est disponible sur l'exploitation et 35€/ha par passage pour une location ou prestation, selon le matériel loué. A cela s'ajoute le coût de la main d'œuvre qui est de 18€/ha environ. La consommation de carburant varie selon le type de travail du sol réalisé et sa profondeur (Machet et al. 2018). Une potentielle augmentation de la fertilisation azotée peut élever les charges opérationnelles jusqu'à 30€/ha environ. Un nécessaire recours aux pesticides peut également s'additionner (Machet et al. 2018; Van Dijk et al. 2018).

Une application d'1,25 tonne (T) de paille par hectare provenant de balles coûte environ 270€/ha pour les cultures ne pouvant réutiliser leur résidus. Si la paille est achetée et transportée, un supplément de 45 à 200€/T peut avoir lieu (Cerdà et al. 2016).

La non valorisation de la paille risque de réduire la marge brute malgré une potentielle augmentation du rendement. Cette dernière sera d'autant plus diminuée si la restitution des résidus est couplée d'une augmentation d'intrants (pesticides et engrais) (Van Dijk et al. 2018).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les mulchs permettent de réduire les émissions de CO₂ directes grâce à un moindre travail mécanique (Van Dijk et al. 2018). Néanmoins le bilan GES est variable et peut augmenter à cause du processus de minéralisation des MO (Matières organiques) et des émissions de N₂O qui y sont relatives. Ce processus de dégradation de l'humus dans le sol joue en faveur de la séquestration de CO₂. Malheureusement peu de données sont aujourd'hui disponibles (Labreuche and Deschamps 2016).

Il semble que les pratiques suivant l'enfouissement des résidus vont avoir davantage d'effets sur les émissions de CO₂ directes liées au carburant, sur le bilan GES et sur la séquestration de carbone. Elles sont décrites dans la partie sur le travail du sol, page 58.

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

La restitution des résidus de culture limitent les risques de formation de croûtes de battance, de compaction des sols et d'érosion (Cerdà et al. 2016; Labreuche and Deschamps 2016). Ils réduisent la vitesse d'acidification des sols (Machet et al. 2018). Leur dégradation augmente le taux de matières organiques. Par exemple, le broyage de 8 à 10 tonnes de cannes de maïs grains produites restitue 1600 à 2000 kg de MO (Labreuche and Deschamps 2016). L'amélioration de la structure du sol est liée à l'augmentation de la biodiversité qui y réside. Les résidus enfouis dans le sol sont à proximité des micro-organismes qui les dégradent rapidement, assurant le recyclage des nutriments et donc une réduction de la lixiviation (Labreuche and Deschamps 2016; Machet et al. 2018). L'infiltration et le stockage d'eau dans le sol sont favorisés, réduisant le risque de transfert et de ruissellement (Jabran et al. 2015; Tanveer et al. 2017).

ii. Remarques

La restitution des résidus de culture est une pratique très associée aux TCS et aux TSL, notamment lorsqu'un semis direct y est réalisé (Machet et al. 2018; Van Dijk et al. 2018). Elle peut avoir des répercussions très contrastées sur l'incidence des bio-agresseurs et sur les rendements. L'intérêt de cette pratique est à analyser selon le contexte climatique. S'il est démontré, la mise en place de cette pratique sur un îlot de parcelles serait bien plus efficace qu'à l'échelle d'une parcelle seulement (Labreuche and Deschamps 2016; Blaszczyk 2020; Machet et al. 2018).

Cette pratique est à envisager au regard des autres valorisations de la paille. Un risque de concurrence avec l'alimentation et la litière du bétail ou encore la fabrication d'isolants ou de bioénergies peut avoir lieu (Machet et al. 2018).

iii. Bilan

L'enfouissement des résidus de culture offre une protection du sol comparable à celle d'un couvert (Labreuche and Deschamps 2016). Les résidus réduisent la température du sol et augmentent l'humidité. Ils sont utilisés pour lutter contre les adventices, les maladies, les ravageurs ou pour influencer la fertilisation. Leur efficacité est variable et dépend du type d'adventices, du rapport C/N des adventices, des prédateurs natifs et du contexte climatique. Les rendements vont tendre à se réduire dans des climats humides et vont accroître dans des conditions sèches. Le temps de travail tant à augmenter avec la mise en place de cette pratique. Le coût de production varie selon le matériel à disposition, la nature des résidus et leur origine et les autres voies de valorisation envisageables.

Le bilan des émissions de GES est mitigé et dépend principalement du type de travail du sol réalisé entre l'enfouissement des résidus et le semi de la culture suivante. Cette pratique semble néanmoins en faveur de la séquestration de CO₂. Elle améliore la qualité du sol et limite son érosion. La qualité de l'eau et son infiltration sont également améliorées. Cette pratique joue en faveur de la micro-biodiversité du sol. Très liée aux TCS et TSL, décrites page 52, son efficacité semble supérieure à l'échelle d'un îlot plutôt qu'à l'échelle de parcelles isolées. Le choix de cette pratique dépend des autres possibilités de revalorisation des résidus de culture.

3. Introduction d'infrastructures agro-écologiques

Les infrastructures agro-écologiques (IAE) correspondent aux éléments fixes et semi-naturels du paysage qui ne reçoivent ni fertilisants chimiques ni pesticides. Situés à proximité de parcelles cultivées, ils sont entretenus pour leurs services rendus envers les cultures et l'environnement. Elles sont source d'habitats pour la faune et la flore sauvage et favorisent la présence d'auxiliaires pour lutter contre les ravageurs (Sarhou 2016). Certaines IAE comme les bandes enherbées, les haies et les taillis sont également des Zones Tampons (ZT) et assurent l'interception et l'atténuation des transferts de molécules vers l'environnement ("Fonctions et Efficacité Des Zones Tampons" n.d.). Cette partie se concentre sur ces dernières.

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Les principaux intrants concernés par les ZT sont les insecticides. Elles n'ont pas d'effet direct sur la consommation d'engrais, mais peuvent avoir un effet sur la disponibilité en eau pour les cultures.

Insecticides

Le niveau de régulation biologique des ravageurs est très variable selon les études (Jeanneret et al. 2017; Lacas et al. 2005). D'après une analyse de 18 études menées en Europe, aux USA et en Nouvelle-Zélande, la mise en place de bandes enherbées et fleuries permet de réduire d'environ 16% la pression des ravageurs sur les parcelles cultivées adjacentes (Albrecht, Tschumi, and Blaauw 2020). Cette réduction ne permet pas de se passer d'insecticides. Or des retours d'agriculteurs français et néerlandais montrent qu'une fois l'équilibre ravageurs-auxiliaires retrouvé grâce aux bandes fleuries, il est possible de se passer de certains insecticides sur des cultures de pommes de terre, de colza, de céréales et de betteraves (Viel 2014).

La présence de bandes enherbées ou fleuries peut augmenter l'abondance d'adventices dans le premier mètre de culture adjacent. A partir de deux mètres de distance, la couverture d'adventices au sein de la parcelle cultivée n'est pas influencée par la bande enherbée (Caroline Gibert 2020).

Eau

En grande culture, la présence de haies ou d'arbres peut entrer en compétition avec les cultures pour la ressource en eau. Ce stress hydrique peut dans certains cas réduire les prélèvements azotés des cultures, ce qui se répercute sur leur croissance et sur la masse sèche récoltée (Swieter, Langhof, and Lamerre 2021).

Effets sur le rendement

Les bandes enherbées n'ont pas d'effet significatif et constant sur les rendements (Albrecht, Tschumi, and Blaauw 2020; Viel 2014). Lorsque les IAE sont des surfaces boisées, des haies ou des surfaces en agroforesterie, des pertes de rendements peuvent être observées sur les premiers mètres à cause de la concurrence des racines pour la ressource en eau et de l'ombrage (Caroline Gibert 2020).

Il est possible de valoriser la biomasse de certaines infrastructures. Les coupes issues des bandes enherbées, lorsque celles-ci ne sont pas déclarées en gel, peuvent servir de fourrage, de litière ou à produire du méthane. Il est possible de récolter 7 à 16 tonnes de biomasse ou de bois d'énergie 7 à 10 ans après l'implantation de taillis à courte rotation (Bailleux 2017).

Effets sur le temps de travail

La mise en place de ZT demande entre la préparation du sol, le semi et l'entretien, de deux à une dizaine d'heures de travail par hectare et par an (Kürsten 2020). A cela s'ajoute le temps lié à l'observation des interactions auxiliaires/ravageurs (Viel 2014). Néanmoins, leur présence peut potentiellement éviter le temps consacré à un passage d'insecticide.

Effets sur le coût de production

La préparation du sol, le semi et l'entretien d'une bande enherbée coûte entre 400 et 630€/ha/an (Chenu et al. 2014; Colnenne-David and Bamière 2013). Ces pratiques peuvent nécessiter des outils spécifiques. Un gain économique de 4 à 40€/ha sur la parcelle adjacente peut être réalisé si l'on se passe de traitements phytosanitaires. Ces coûts sont $\frac{2}{3}$ à $\frac{3}{4}$ inférieurs à ceux d'une culture de céréales.

Il existe plusieurs financements relatifs à l'implantation de ces ZT. Elles sont pour la majorité liées à la PAC. Des subsides pouvant atteindre 975€/ha existent en Allemagne. Ils permettent une marge de qui peut aller jusqu'à 600 ou 800€/ha (Kürsten 2020).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Le travail du sol des IAE est égal ou inférieur à celui de la culture adjacente. Les émissions de N₂O qui lui sont liées sont donc inférieures ou égales. Comme elles ne sont ni traitées ni fertilisées, elles émettent moins de CO₂ direct et indirect et de N₂O que les cultures adjacentes. Ces émissions restent néanmoins peu quantifiées (Colnenne-David and Bamière 2013).

Les taillis peuvent stocker jusqu'à 3,4 T C/ha/an dans leur végétation et jusqu'à 0,62 T C/ha/an dans le sol (Kürsten 2020). Certaines analyses de sol réalisées en Angleterre et en Hongrie constatent que les bandes enherbées contiennent plus de carbone (4,3%) que le sol des IAE boisées (3,4%) ou des parcelles adjacentes cultivées (2,6%) (Caroline Gibert 2020). D'autres recherches ont démontré que la présence de taillis au bord de cultures augmente la teneur en carbone dans les premiers cm du sol des cultures et ce sur une trentaine de mètres. D'après elles, 1 à 5 tonnes de carbone peuvent être stockées dans les premiers cm du sol des cultures situées jusqu'à 30 mètre d'une IAE boisée, grâce aux restitutions (feuilles...) (Kürsten 2020). L'INRAE estime la capacité de séquestration de carbone des bandes enherbées à 0,49 Mg de C/ha/an environ (Colnenne-David and Bamière 2013).

Autres effets sur le sol, l'eau l'air et la biodiversité

Le ruissellement est réduit de 50% entre une parcelle et un cours d'eau pour une ZT de 15 m (Lacas et al. 2005). Les pesticides et nutriments y sont infiltrés, retenus, dissous ou dégradés (Liger et al. 2015). Cela permet une réduction de 25 à 96% de leur concentration entre le ruissellement initial et la concentration observée au niveau d'une nappe phréatique, selon les types de sols et le type de ZT implanté (Lacas et al. 2005; Liger et al. 2015). Outre la protection des ressources en eau, ces zones offrent des gîtes aux oiseaux, aux mammifères et à la faune auxiliaire. Elles favorisent la présence de pollinisateurs. Une amélioration de la qualité des sols et une réduction des risques d'érosion sont aussi observées (Gril, Carluer, and Le Hénaff 2011). Tous ces effets dépendent fortement du type de ZT implanté.

b. Remarques

L'impact des ZT sur les ravageurs et leur efficacité dans la lutte biologique dépend de leur type, leur proximité aux cultures et leur proportion (Jeanneret et al. 2017). Leur aptitude à filtrer et à atténuer des molécules dépend aussi de la nature des sols (Gril, Carluer, and Le Hénaff 2011). C'est pourquoi un diagnostic de la situation pédologique de la parcelle et des processus spécifiques qui y ont lieu doit être fait avant leur implantation (Gril, Carluer, and Le Hénaff 2011; Lacas et al. 2005).

c. Bilan

Les IAE comme les bandes enherbées et les taillis ont des effets très variables dans la lutte contre les ravageurs présents dans les cultures adjacentes et donc sur la réduction du recours aux insecticides. Aucun effet significatif sur les rendements des cultures adjacentes n'est constaté et il est possible de valoriser la biomasse produite de certaines IAE.

Leur gestion demande une dizaine d'heures de travail par an et leur coût de production est $\frac{3}{4}$ à $\frac{3}{4}$ inférieur à celui d'une culture de céréale. Ces IAE émettent autant ou moins de GES que les cultures adjacentes et séquestrent de plus grands volumes de carbone. Une meilleure infiltration de l'eau est observée, ce qui réduit le ruissellement et les concentrations en pesticides, protégeant ainsi les ressources en eau. La qualité des sols est améliorée, les risques d'érosion sont réduits et la biodiversité est préservée.

C. Choix variétaux

1. Sélection variétale

Pour être commercialisées ou échangées, toutes les semences des principales espèces agricoles sont inscrites au catalogue officiel des espèces et des variétés, selon la réglementation européenne. La VATE (Valeur Agronomique, Technologique et Environnementale) figure parmi les examens réalisés pour inscrire de nouvelles variétés au catalogue. La nouvelle variété doit satisfaire ces critères et être plus performante que les variétés témoins de l'espèce. Les critères de cette évaluation ne sont, malgré tout, pas harmonisés entre les États membres (GNIS n.d.).

Aucune variété ne cumule systématiquement tous les critères d'intérêts (résistance au stress hydrique, capacité de rendement, résistance aux bio-agresseurs, panification adéquate, qualité nutritionnelles et gustatives...). Pour mettre à profit les résistances variétales, le choix des variétés est à raisonner en fonction des principaux risques présents sur les parcelles dans lesquelles elles sont cultivées (AUDIGEOS et al. 2018).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

La majorité des variétés résistantes aux bio-agresseurs connues concernent les maladies. Quelques variétés résistantes ou tolérantes aux adventices existent. Compétitives, elles produisent des exsudats chimiques inhibant le développement d'autres plantes ou assurent une meilleure couverture du sol. Peu de variétés sont aujourd'hui résistantes aux ravageurs (Guyomard et al. 2013).

Une réduction allant de 25 à 50% de l'utilisation de fongicides pour les grandes cultures a été constatée en France, Angleterre et Danemark, si les programmes de protection phytosanitaire sont adaptés (Jorgensen et al. 2017). L'utilisation de variétés de blé résistantes à la septoriose permet une réduction de la dépense en fongicide de 20€/ha à 30€/ha en moyenne (Hourcade et al. 2015; AUDIGEOS et al. 2018).

Aucune variété ne cumule un niveau et une diversité suffisante de résistance pour permettre de se passer complètement de protection chimique sans risquer une perte importante de rendement par rapport à un usage conventionnel de pesticides (AUDIGEOS et al. 2018). Des suivis dans des exploitations de grande culture ont montré que l'ajustement du programme de traitement en fonction des parcelles contenant des variétés résistantes, tolérantes ou sensibles n'est pas systématiquement effectué (Guyomard et al. 2013). Le bénéfice lié à l'utilisation de telles variétés n'est donc pas totalement valorisé par les agriculteurs.

Engrais

La capacité de réduction de la consommation d'azote d'une variété n'est pas exprimée. Il s'agit plutôt d'étudier l'efficacité de l'usage d'azote, le NUE (Nitrate Use Efficiency). Les variétés dont le NUE est amélioré sont sélectionnées indirectement. Elles correspondent aux variétés améliorées pour accroître les rendements et leurs qualités (Guyomard et al. 2013; Cormier et al. 2016)). Plusieurs études ont montré a posteriori que la sélection variétale a permis au bout de 10 ans d'amélioration génétique de réaliser des économies de 6 à 8 kg.N/ha dans des cultures de blé (Cormier et al. 2016). Une réduction de 40 unités d'azote par rapport aux préconisations a été obtenue pour le colza, tout en maintenant des rendements et des teneurs en protéines acceptables selon le cahier des charges (Charbonnier and Fugerey-scarbel 2019).

L'absence de quantification du potentiel de réduction des engrais azotés ainsi que la non diffusion de ce potentiel auprès des agriculteurs découlent de cette sélection indirecte. Aucune valorisation particulière pour les variétés plus efficaces en azote n'existe pour leur inscription au catalogue (Charbonnier and Fugerey-scarbel 2019). Le NUE doit être davantage pris en compte dans la sélection variétale (Cormier et al. 2016). Le développement de variétés sélectionnées pour leur NUE pourrait réduire l'usage d'engrais azoté d'en moyenne 25% ("Whealbi" 2021).

Eau

Concernant la gestion de l'eau, il s'agit de trouver des variétés tolérantes au stress hydrique pour minimiser les conséquences d'une sécheresse sur le rendement. Bien que les critères environnementaux de la VATE mentionnent évaluer l'adaptation de la variété aux itinéraires techniques dont l'accès à l'eau est limité, certains estiment que cela n'est pas suffisamment pris en considération (Quenin 2020).

Certaines variétés de blé ont des pertes de rendement inférieures à 10% lorsqu'elles sont soumises à un stress hydrique, ce qui est peu par rapport à d'autres variétés moins adaptées. Les semences paysannes, qui sont sélectionnées et replantées d'une année sur l'autre par les agriculteurs, présentent plus d'hétérogénéités et sont mieux adaptées aux variations climatiques. Elles ont néanmoins un rendement inférieur aux variétés « classiques » (Aspar 2019).

Le choix de variétés précoces ou à floraison tardive permet d'éviter de faire coïncider les périodes sensibles du cycle végétatif avec les périodes de stress hydrique. Une étude estime que les rendements de maïs pourraient augmenter de 4 à 7% d'ici 2050 si cette stratégie d'esquive est mise en place. Cette possibilité n'est pas réalisable pour toutes les espèces en grande culture. Elle concerne essentiellement le maïs, le tournesol et le sorgho (Parent, Welcker, and Tardieu 2019).

Effets sur le rendement

L'utilisation de variétés résistantes aux bio-agresseurs et l'adaptation du programme de traitement permet d'améliorer les performances productives sur les plans quantitatif et qualitatif (Guyomard et al. 2013).

Le potentiel de perte au champ est moindre (1 T/ha) pour des variétés résistantes aux bio-agresseurs que pour des variétés plus sensibles (2,5 T/ha) (Jorgensen et al. 2017). Des gains de 7 à 10 q/ha ont été observés pour des variétés de blé résistantes à la septoriose et à la rouille en comparaison aux variétés sensibles (Hourcade et al. 2015; AUDIGEOS et al. 2018).

Le recours à des variétés plus adaptées à la sécheresse minimise les pertes de rendements.

Effets sur le temps de travail

Une variété de blé résistante au piétin, à la fusariose ou à la verse peut permettre la suppression d'un traitement à condition que les objectifs de production soient satisfaisants, ce qui se traduit en une réduction de la charge de travail (AUDIGEOS et al. 2018). Néanmoins, l'observation fine de l'état sanitaire des cultures pour raisonner le programme de traitement en fonction de la pression des bio-agresseurs peut être chronophage, tout comme l'acquisition de compétences nécessaires pour le faire (Guyomard et al. 2013).

Effets sur le coût de production

Le coût de semences résistantes ou tolérantes peut être supérieur à celui de semences non résistantes. Cette différence est négligeable par rapport au coût que représente un investissement matériel. Il s'agit donc d'une alternative peu onéreuse (Guyomard et al. 2013). Si un traitement phytosanitaire peut être évité, une économie de carburant et de main d'œuvre peut être observée en plus d'une économie de pesticides, ce qui représente un gain potentiel de 30 à 60 €/ha en grandes cultures (AUDIGEOS et al. 2018).

Les effets d'une potentielle réduction des engrais azotés liée à l'utilisation de variétés dont le NUE est élevé ne sont pas comptabilisés ici.

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Une réduction du nombre de traitements phytosanitaires induit une réduction de la consommation de carburant liée à l'utilisation d'un pulvérisateur. La consommation d'énergie indirecte liée à la fabrication de pesticides est réduite (Guyomard et al. 2013).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Dans la même logique, une réduction du passage d'engins agricoles lié aux traitements réduit les risques de tassements. Si les quantités d'azote épandues sont réduites, le risque de lixiviation est amoindri ("Whealbi" 2021). Une réduction du nombre de traitements diminue également le risque de pollution des nappes phréatiques, et accroît la présence de biodiversité. De telles variétés sont moins sensibles aux aléas naturels et aux effets du changement climatique (Guyomard et al. 2013).

b. Bilan

L'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes aux bio-agresseurs permettrait d'en réduire l'incidence et donc de prévenir le recours aux pesticides, si les programmes de protection sont adaptés à la pression phytosanitaire. Cela aurait également pour effet une réduction du coût de production. Les rendements obtenus sont égaux ou plus importants que ceux mesurés pour une variété plus sensible. Les effets liés à l'utilisation de variétés résistantes sur le temps de travail et sur la réduction des GES restent néanmoins discutés. Cette méthode est à associer à d'autres moyens de lutte pour prévenir d'un éventuel contournement des résistances par les bio-agresseurs (Guyomard et al. 2013).

Les variétés ayant une utilisation efficiente de l'azote pourraient potentiellement réduire le recours aux engrais azotés. Celles tolérantes à la sécheresse ou qui ont la capacité d'adapter leur cycle de production aux contraintes hydriques ont un grand intérêt pour faire face au changement climatique. Or ces critères peuvent ne pas être suffisamment pris en compte lors de l'inscription au catalogue.

2. Mélanges de variétés sur une même parcelle

Les mélanges variétaux ont un regain d'intérêt. Les principaux objectifs des agriculteurs sont d'assurer la stabilité des rendements, de réduire de l'incidence des bio-agresseurs et par conséquent l'usage des pesticides. Les travaux de recherches réalisés jusqu'à présent se concentrent essentiellement la gestion des maladies et les gains de rendements (Borg et al. 2018).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

L'utilisation de mélanges variétaux sur une même parcelle, pour des cultures de plein champ, augmente la richesse allélique des gènes de résistance. Un ralentissement de la progression des épidémies est observé. Le contournement des résistances des variétés par les populations de pathogènes est retardé, allongeant ainsi leur durée. L'association de variétés portant des gènes et des allèles différents peut étendre la protection des cultures à divers bio-agresseurs et améliore les résultats obtenus (Guyomard et al. 2013). Il est démontré que les mélanges de 3 à 5 variétés sont plus efficaces que les associations binaires. L'efficacité des mélanges variétaux par rapport à l'efficacité moyenne des cultures monovariétales qui les composent reste tout de même variable selon les cultures, les variétés et les bio-agresseurs (Vallavieille-Pope et al. 2016).

Une moindre utilisation de pesticides, en particulier de fongicides, est observée, réduisant les coûts liés à leur utilisation (Vallavieille-Pope et al. 2016). Le Tableau 17 résume les résultats obtenus concernant la réduction de protection phytosanitaire liée à l'utilisation de mélanges variétaux par rapport à la moyenne des variétés seules.

Tableau 17 - Comparaison des résultats obtenus avec ou sans mélanges variétaux

Culture	Maladie	Incidence de la maladie en monovariétal	Incidence de la maladie en mélange variétal	Effets du mélange sur l'usage de pesticides	Pays	Source
Orge	Oïdium	50%	10%	Réduction	Allemagne	(Vallavieille-Pope et al. 2016)
Blé	Septoriose			Réduction de 7%	France	(Vallavieille-Pope et al. 2016; Lorgeou and Philippe Du Cheyron 2019)
Riz	Pyriculariose	20%	1%	Passage de 3 à 7 traitements en culture monovariétale à 1 traitement en culture pluri-variétale	Chine	(Vallavieille-Pope et al. 2016)

Plusieurs pays européens travaillent déjà à partir de mélanges variétaux. Au Danemark, 9 à 12% de l'orge de printemps est semé en association de 3 à 4 variétés. Des variétés d'orge associées sont produites pour l'alimentation du bétail en Ecosse. En Pologne, 22% des céréales sont produites en associant généralement 3 variétés. Des études ont montré que les mélanges variétaux réduisent la sévérité du mildiou sur la pomme de terre en France (Vallavieille-Pope et al. 2016).

L'analyse de 60 études montre que la diversité intra-spécifique des cultures et donc la présence de plusieurs variétés au sein d'une même parcelle réduit la présence d'insectes herbivores et les dommages qu'ils causent (Koricheva and Hayes 2018).

Azote

Les mélanges variétaux seraient plus bénéfiques que des variétés esseulées lorsque de faibles quantités d'engrais sont utilisées (Borg et al. 2018). L'adoption de mélanges variétaux complique la gestion de la fertilisation, car les besoins azotés ne coïncident pas à cause du développement asynchrone des variétés (Labarthe et al. 2018).

Eau

Les mélanges variétaux n'influencent pas les quantités d'eau consommées mais ils aideraient à stabiliser les rendements en cas de stress hydrique (déficit d'irrigation, sécheresse ou gel) (Borg et al. 2018).

Effets sur le rendement

Les rendements obtenus avec des mélanges variétaux sont supérieurs ou égaux aux rendements obtenus en culture monovariétale dans 70% des cas.

L'analyse d'une trentaine d'études en Amérique du Nord et en Europe montre une augmentation moyenne du rendement de 3,5% pour des mélanges variétaux de blé par rapport à la moyenne des rendements des variétés esseulées. En cas de forte pression de maladies, l'augmentation du rendement peut atteindre 6,2%. Le rendement augmente en moyenne de 5,3% pour des mélanges présentant une forte hétérogénéité des gènes de résistance par rapport à des mélanges de variétés plus homogènes (Borg et al. 2018). Une augmentation du rendement variant entre 0,5 et 3,2 q/ha a été obtenue sur des cultures de blé en France sous une protection phytosanitaire allégée (un traitement fongique en moyenne) ou nulle (Vallavieille-Pope et al. 2016; Lorgeou and Philippe Du Cheyron 2019).

Ces différences de rendement entre des cultures monovariétales ou des cultures associant plusieurs variétés ne sont pas toujours significatives. Si les mélanges variétaux obtiennent généralement des rendements supérieurs à la moyenne des rendements des variétés esseulées, leur rendement est souvent inférieur à celui des variétés les plus résistantes lorsqu'elles sont cultivées seules (Lorgeou and Philippe Du Cheyron 2019). Certains affirment que les associations variétales assurent une stabilité des rendements par rapport à des cultures monovariétales (Vallavieille-Pope et al. 2016; Snyder, Gómez, and Power 2020). Or pour d'autres, la stabilité des rendements est surtout définie par les lignées génétiques entrant en jeu (Lorgeou and Philippe Du Cheyron 2019).

Une augmentation de la qualité de la production (teneur en protéines du blé, quantité d'azote dans les graines) et une panification égale aux cultures monovariétales sont obtenues en France (Vallavieille-Pope et al. 2016; Lorgeou and Philippe Du Cheyron 2019).

Effets sur le temps de travail

Comme pour l'utilisation de variétés résistantes en culture monovariétale, l'utilisation de mélanges variétaux peut alléger les programmes de protection phytosanitaire réduisant ainsi les charges de travail. L'adaptation du programme de protection demande en contrepartie du temps et des connaissances pour observer l'état sanitaire des cultures (Guyomard et al. 2013).

Effets sur le coût de production

Une réduction des traitements devrait engendrer une économie de main d'œuvre et de carburant (Guyomard et al. 2013). Snyder, Gómez, and Power (2020) mettent en évidence le manque de données liées au coût de production et souligne le besoin de le prendre en considération pour analyser la rentabilité de cette alternative.

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les émissions de CO₂ directes peuvent être réduites par une diminution de la quantité de carburant utilisée. Elles sont diminuées indirectement, par la réduction du coût énergétique lié à la fabrication de pesticides (Guyomard et al. 2013).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Les mélanges variétaux participent à la diversification des productions si l'échelle variétale est comptabilisée (Guyomard et al. 2013). Elles sont plus bénéfiques que des cultures monovariétales lorsque les sols sont compacts ou dégradés (Borg et al. 2018).

b. Remarques

L'efficacité des mélanges variétaux pour lutter contre les bio-agresseurs dépend du type d'agression potentielle, du contexte pédoclimatique de la parcelle, ainsi que du nombre de gènes de résistance existant contre les bio-agresseurs ciblés. Ces mélanges sont efficaces si la diversité de gènes et d'allèles de résistance qu'ils contiennent est suffisante. Une caractérisation fine des variétés assure une telle diversité. Or cela passe par la publication de la cartographie des gènes, ce qui relève du domaine du secret industriel (Guyomard et al. 2013). Outre la caractérisation et la commercialisation des mélanges de variétés en amont, leur collecte une fois récoltés n'est pas toujours garantie (Guyomard et al. 2013; Vallavieille-Pope et al. 2016)).

La répartition spatiale et temporelle de la prolifération des maladies est difficile à estimer et les lacunes liées à la connaissance des gènes de résistance compliquent la formulation de règles d'application de mélanges variétaux. Mais, adaptés aux conditions et pressions locales, les mélanges variétaux peuvent être appliqués en tant que mesure de prévention évitant d'une part les résistances aux pesticides et d'autre part un ou deux traitements fongiques. Leur mise en œuvre peut être plus simple que l'association de différentes espèces. En effet, des variétés d'une même espèce peuvent avoir des périodes de récolte similaires, et nécessitent le même type de matériel et les mêmes connaissances agronomiques (Snyder, Gómez, and Power 2020).

c. Bilan

Les mélanges variétaux sont des mesures préventives contre la résistance aux pesticides. Ils permettent généralement de réduire d'un ou deux traitements fongiques en maintenant ou améliorant les rendements par rapport à des cultures monovariétales. Peu coûteux, cela limite également les dépenses liées aux pesticides, à l'utilisation de pulvérisateur et de main d'œuvre. Les effets sur le temps de travail sont tout de même discutés, la réduction du temps de traitement étant contrebalancée par une augmentation du temps d'observation. Indirectement les émissions de GES peuvent être réduites. Les mélanges variétaux augmentent la résistance et la résilience face aux aléas comme les dégradations des sols et les stress hydriques et azotés (Vallavieille-Pope et al. 2016; Borg et al. 2018; Guyomard et al. 2013; Snyder, Gómez, and Power 2020).

Les mélanges variétaux peuvent être une alternative à la diversification des cultures, simplifiant la gestion par rapport à l'association de différentes espèces. Mais leur mise en place demande une adaptation des filières en amont et en aval.

D. Travail du sol

Le travail du sol affecte l'état physique, chimique et biologique d'une parcelle cultivée. Il a un rôle direct sur la localisation des matières organiques, des minéraux et du carbone, ainsi que sur le transfert d'eau et des molécules qui y sont dissoutes. Il peut également influencer la présence de certaines maladies et adventices. Ces effets varient selon les dates d'intervention, les outils et la profondeur travaillée. Cette dernière permet de classer les opérations du sol en trois catégories différentes.

Le travail du sol le plus commun en Europe est le labour. Il fragmente, retourne et déplace le sol à une profondeur de 20 à 35 cm. Son but est de détruire les adventices et les repousses, d'enfouir les amendements et les résidus de cultures ou de produits phytosanitaires pouvant être phyto-toxiques pour la culture suivante. Il s'agit de la technique ayant le plus d'impact sur les composantes physique, chimique et biologique du sol, à cause du volume de terre et de l'inversion des horizons qu'il crée. Une mauvaise réalisation du labour est un risque assez fréquent. Cela peut induire des semelles de labour, un compactage sous l'horizon labouré.

Un travail superficiel du sol aussi appelé Travail cultural simplifié (TCS) à moins de 15 cm de profondeur permet de détruire les adventices et les repousses par déchaumage et binage. Il favorise l'humification de la matière organique, nivelle le sol et crée un lit de semence favorable à la germination. Les Techniques Sans Labour (TSL) réduisent le travail du sol à moins de 5 cm de profondeur voire implantent des cultures en semis direct, sans travail préalable du sol (GUILLEMAN et al. 2003; Guyomard et al. 2013). Bien qu'il tende à se développer en Europe, il est bien moins démocratisé que sur le continent Américain. Les faux-semis, détaillés page 27 font partie des pratiques mises en œuvre en TSL.

Le sous-solage régénère la structure des horizons qui sont situés sous le fond de labour et ne sont pas fragmentés annuellement par des outils de préparation du sol. Cette opération améliore la croissance en profondeur des racines et favorise le drainage de l'eau à une profondeur de 50 à 85 cm (GUILLEMAN et al. 2003). Étant réalisée moins systématiquement que les autres types de travail du sol, elle n'est pas traitée dans cette partie.

1. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

Herbicides

Le labour enfouit en profondeur les adventices et leurs semences, ce qui permet de les contrôler sans consommer d'herbicides. A l'inverse, les TCS et TSL risquent d'accroître le recours aux herbicides car une perturbation superficielle du sol favorise la levée de certaines adventices (Guyomard et al. 2013). Le Tableau 18 confirme cette affirmation pour des rotations de céréales – légumineuses, bien qu'il y ait eu un traitement herbicide.

Tableau 18 - Effets des TCS et TSL sur la présence d'adventices par rapport à un travail du sol conventionnel

Type de travail du sol	Effet sur la présence d'adventices par rapport à un travail conventionnel du sol	Type de recours aux herbicides	Source
TCS	+ 15%	3 L/ha de glyphosate en post-récolte et herbicides sélectifs	(Panasiewicz et al. 2020)
TCS	+ 16%	20% du coût de production	(Chetan et al. 2016)
TCS	2 fois plus	3 L/ha de glyphosate en post-récolte et en pré-émergence	(Wozniak et al. 2019)
TSL	+ 30%	3 L/ha de glyphosate en pré-émergence puis en post-récolte et herbicides sélectifs	(Panasiewicz et al. 2020)
TSL	1 ½ fois plus	4 L/ha de glyphosate et herbicides sélectifs	(Wozniak and Soroka 2018)

Fongicides

Le labour enfouit les résidus de culture et les pathogènes qui peuvent les contaminer. Cela permet un premier contrôle des maladies indépendamment des fongicides. Cette régulation des maladies est réalisée en TCS et TSL par l'activité microbienne à la surface du sol (Gawęda et al. 2020). Malgré tout, le non enfouissement des résidus de cultures contaminés peut favoriser la transmission de maladies à la culture suivante, notamment en monoculture (Guyomard et al. 2013). Les TCS et les TSL augmentent l'incidence des maladies fongiques comme le montre les résultats d'études donnés dans le Tableau 19.

Tableau 19 - Effets des TCS et TSL sur l'incidence des maladies fongiques par rapport à un travail du sol conventionnel

Culture	Type de travail du sol	Maladie	Effet sur l'incidence par rapport à un travail du sol conventionnel (%)	Source
Orge	TCS	Fusariose	+ 49	(Schöneberg et al. 2016)
Soja	NTL	<i>Ascochyta</i>	+ 51,9	(Gawęda et al. 2020)
		<i>Septoria glycines</i>	+ 32,4	(Gawęda et al. 2020)
		<i>Cerospora sojina</i>	+ 43,4	(Gawęda et al. 2020)

Le labour réduit également le développement des ravageurs sur les cultures (campagnols, limaces...). Les TCS et TSL ne permettent pas de lutter aussi efficacement contre ces bio-agresseurs (Guyomard et al. 2013).

Engrais

Le travail du sol joue en faveur de la mise à disposition de l'azote pour les cultures. Il augmente les macropores dans le sol, permettant une meilleure propagation de l'air, de la température et de l'eau. Les conditions humides et l'élévation de la température accroissent l'activité microbienne. La matière organique est répartie et mise à disposition des micro-organismes, favorisant ainsi la minéralisation de l'azote (Lipenite, Karklins, and Ruza 2018; Broué 2016). Dans certaines conditions, comme un terrain mal drainé, le travail du sol peut provoquer des accidents de structure. Les conséquences sont une réduction de la porosité et des effets inverses sur les micro-organismes et la minéralisation de l'azote (Lipenite, Karklins, and Ruza 2018; Broué 2016).

Les quantités d'azote minéralisées sont annuellement comparables quel que soit le travail du sol (Lipenite, Karklins, and Ruza 2018; Broué 2016). Le type de travail effectué influence le moment où l'azote est minéralisé et disponible pour les cultures.

En sortie d'hiver, l'excès d'eau empêche le sol de se réchauffer. Le labour augmente la température et favorise la minéralisation de l'azote qui est disponible lors des premières phases de croissance des cultures (BOURGEOIS et al. 2013; Lipenite, Karklins, and Ruza 2018). Il permet un relargage d'azote pouvant aller jusqu'à 50 ou 100 kg d'N/ha (Thomas 2007). Ces quantités d'azote libérées lors d'un travail du sol en automne ne sont pas totalement captées, même en présence d'un couvert durant l'interculture. Un labour à cette période risque donc de favoriser la lixiviation (BOURGEOIS et al. 2013).

En TCS et TSL, l'augmentation de la matière organique dans les horizons superficiels du sol maintient une humidité élevée tout au long de la saison dans les régions sèches (Lognoul 2020; Broué 2016). Associée à des températures basses en sortie d'hiver, cela crée des conditions qui ne sont pas favorables aux processus de minéralisation. Le ralentissement de la minéralisation à cette période induit une augmentation de la fertilisation de 10 à 20% les premières années (Lognoul 2020; Broué 2016). Une minéralisation plus tardive assure une mise à disposition de l'azote aux plantes plus étalée dans la saison.

D'autres facteurs comme le type de sol et la localisation du site influencent également la mise à disposition de l'azote aux cultures. Cela explique les résultats très contrastés obtenus lors d'essais sur l'impact du travail du sol sur la fertilisation (Lipenite, Karklins, and Ruza 2018).

L'enfouissement d'engrais à une profondeur de 10 ou 15 cm accroît l'efficacité des apports. Cela permet une économie de 7 kg d'azote organique ou de 12 kg d'azote minéral par hectare en moyenne (Normandie 2016).

Eau

Le travail du sol influence la capacité d'infiltration et de rétention de l'eau dans le sol. Ses effets, et plus largement ceux de différents systèmes de culture sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans le sol varient selon le type de sol, le taux de matière organique et le climat. Ils sont peu étudiés (Habbib et al. 2020). Les résultats d'une modélisation sur les capacités de rétention d'eau des sols sableux ou limoneux contenant différents taux de matière organique confirment ces affirmations (Lutz et al. 2019). Ils sont présentés Tableau 20.

Tableau 20 - Effet du type de travail du sol sur la capacité de rétention d'eau en fonction du type de sol et du taux de matière organique (Lutz et al. 2019)

Type de sol	Taux de matière organique	Type de travail du sol	Effet sur la capacité de rétention de l'eau
Sableux	0%	Labour	+ 83%
	8%	TSL	+ 105%
		Labour	+ 84%
Limoneux	0%	Labour	+ 16%
	8%	TSL	+ 31%
		Labour	+ 26%

Une augmentation de la capacité de stockage d'eau est observée après le travail du sol en labour, en TSL ou en TCS, mais elle est plus élevée pour les TCS et TSL. Certains affirment néanmoins que cette tendance s'inverse sur le long terme lors d'un labour (Aspar 2019).

Effets sur le rendement

Aucune différence significative n'est observée pour les rendements obtenus en TSL ou en labour conventionnel d'après une méta-analyse réalisée sur 251 études long-terme en Europe (Sandén et al. 2018). Or en TSL, une réduction moyenne de 8,5% du rendement a été constatée d'après une revue de 171 observations en Europe. Une réduction de 9,8% a également été constatée en Suède à partir de 226 observations (Townsend, Ramsden, and Wilson 2016).

D'après la méta-analyse européenne, les TCS induisent une perte de rendement d'en moyenne 4% par rapport à un labour conventionnel (Sandén et al. 2018). Cela concorde avec les pertes de rendement constatés dans 563 autres études européennes (Townsend, Ramsden, and Wilson 2016).

Effets sur le temps de travail

Une réduction du temps de travail est généralement constatée lors d'un travail superficiel du sol ou d'un non-labour. Ce gain de temps varie selon les cultures et le contexte pédoclimatique et géographique. Il peut atteindre 60% pour les TCS et 80% en TSL comme le montrent les Tableau 21 Tableau 22. D'après l'ECAF (European Conservation Agriculture Fédération), le non labour permet de gagner 3 à 5 heures de travail par hectare (ECAF 2021).

Outre la réduction du temps de traction, ces techniques permettent de mieux répartir les pics de travail durant une année (Guyomard et al. 2013).

Tableau 21 - Comparaison de l'effet des TCS sur le temps de travail par rapport à un travail conventionnel du sol

Culture	Temps de travail en TCS (h/ha)	Temps de travail avec labour conventionnel (h/ha)	Effet sur le temps de travail par rapport à un travail du sol conventionnel (%)	Source
Riz	3	4,5	32	(Calcante and Oberti 2019)
Blé	1	2,5	60	(Calcante and Oberti 2019)
Maïs	4,18	5,75	27	(Vach, Hlisnikovský, and Javůrek 2018)
Blé			50	(Lithourgidis et al. 2006)

Tableau 22 - Comparaison de l'effet des TSL sur le temps de travail par rapport à un travail conventionnel du sol

Culture	Temps de travail en TSL (h/ha)	Temps de travail avec labour conventionnelle (h/ha)	Effet sur le temps de travail par rapport à un travail du sol conventionnel (%)	Source
Riz	2,8	4,5	38	(Calcante and Oberti 2019)
Blé	0,5	2,5	80	Calcante and Oberti 2019)
Maïs	5,04	5,75	12	(Vach, Hlisnikovský, and Javůrek 2018)
Blé			50	(Lithourgidis et al. 2006)Lithourgidis 2006

Effets sur le coût de production

Outre la main-d'œuvre nécessaire, la consommation de carburant, de pesticides et d'engrais est influencée par le type de travail du sol.

La réduction de la profondeur des opérations culturales réduit la consommation de carburant en TCS jusqu'à environ 50% comme le montre le Tableau 23. La réduction de consommation de carburant est encore plus importante en TSL, d'après les données compilées dans le Tableau 24. Selon l'ECAF (2021), une réduction de 60 à 80 litres de carburant peut être réalisée en TSL.

Tableau 23 - Consommation de carburant en TCS par rapport à un travail conventionnel du sol

Culture	Effet sur la consommation de carburant par rapport à un travail du sol conventionnel (%)	Source
Riz	- 48	(Calcante and Oberti 2019)
Blé	- 42	(Calcante and Oberti 2019)
Maïs	- 57	(Calcante and Oberti 2019)
Blé	- 32	(Calcante and Oberti 2019)
Céréales	- 23	(Townsend, Ramsden, and Wilson 2016)
Soja – blé– maïs	- 17	(Chetan et al. 2016)
Maïs	- 33	(Vach, Hlisnikovský, and Javůrek 2018)

Tableau 24 - Consommation de carburant en TSL par rapport à un travail conventionnel du sol

Culture	Effet sur la consommation de carburant par rapport à un travail du sol conventionnel (%)	Source
Riz	- 63	(Calcante and Oberti 2019)
Blé	- 75	(Calcante and Oberti 2019)
Maïs	- 61	(Calcante and Oberti 2019)
Blé	- 77 ¹	(Calcante and Oberti 2019)
Céréales	- 58	(Townsend, Ramsden, and Wilson 2016)
Maïs	- 26	(Vach, Hlisnikovský, and Javůrek 2018)

Les charges totales de production peuvent ainsi être réduites si aucun recours aux pesticides n'a lieu pour pallier les effets du labour. Par exemple, elles peuvent être réduites de 16% en TCS et de 19% en TSL pour une production de riz en Italie (Calcante and Oberti 2019). Une réduction de 1,5% est obtenue en TCS en Pologne pour une rotation de céréales et légumineuses et de 6,6% en Roumanie pour une rotation soja-blé-maïs par rapport à leur témoin respectif en travail du sol conventionnel (Chetan et al. 2016; Panasiewicz et al. 2020). Cette économie de charge peut parfois contrebalancer la perte de rendement et permettre une marge brute supérieure à celle obtenue lors d'un travail du sol conventionnel. C'est le cas en Angleterre pour une culture de blé où la marge brute est supérieure de 6% à celle obtenue avec labour (Calcante and Oberti 2019).

A l'inverse, une augmentation du coût de production de 20% en TCS et de 22% à 28% en TSL, peut avoir lieu si le labour est remplacé par une augmentation de l'usage de pesticides (Chetan et al. 2016; Panasiewicz et al. 2020).

Des frais supplémentaires peuvent aussi s'ajouter si le recours aux engrais augmente de 10 à 20% en TCS et TSL (Lognoul 2020; Broué 2016).

Cela peut conduire à une baisse de la marge brute. Des baisses de la marge brute de 16% en TCS et de 34% en TSL liées à un recours élevé aux pesticides par rapport à un témoin avec labour illustrent ce cas de figure (Panasiewicz et al. 2020).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Travailler le sol en TSL augmente en moyenne les émissions de N₂O de 68% par rapport à un labour conventionnel, d'après une méta-analyse réalisée sur 251 études long-terme en Europe (Sandén et al. 2018). Ces émissions seraient plus élevées les dix premières années et diminueraient ensuite. Une réduction des émissions de N₂O est observée en moyenne pour un travail du sol en TCS par rapport à un labour conventionnel. Mais la différence n'est pas significative (Sandén et al. 2018).

Comme pour le N₂O, une réduction non significative des flux de CO₂ provenant du sol est observée en moyenne pour un travail du sol en TCS par rapport à un labour conventionnel (Sandén et al. 2018).

La consommation de carburant est le principal facteur influençant la consommation d'énergie directe et donc d'émissions de eCO₂ lors du travail du sol. TEBRÜGGE and BÖHRNSEN (2001) estiment à partir d'une analyse sur différents types de sols qu'une économie de 40L/ha de carburant permettrait une réduction de 41 kg de eCO₂ par hectare chaque année (Guyomard et al. 2013). En considérant les données décrites dans la partie coût de production, les TSL permettrait de réduire les émissions de CO₂ jusqu'à 82 kg de eCO₂ par rapport à un travail du sol conventionnel.

Le stock de COS est égal quel que soit le travail du sol pour le profil complet du sol (0-150 cm). Mais comme le montre le Tableau 25, l'effet des opérations culturales sur le COS varie selon la profondeur étudiée. Sur un horizon de 0 à 15 cm de profondeur, les TSL et les TCS augmentent la concentration et le stockage de COS par rapport à un labour avec retournement. Cette tendance s'inverse pour les TCS et le labour avec retournement pour un horizon de 15 à 30 cm de profondeur. En TSL, sur une période supérieure à 10 ans, le stock de SOC de l'horizon de 0-30 cm augmente d'en moyenne 4,6 mg/ha par rapport à un labour avec retournement, soit de 5% d'après Sandén et al. (2018), et de 3,85 mg/ha par rapport à un travail du sol en TCS (Haddaway et al. 2017). Aucune autre comparaison n'est significative d'après cette méta-analyse de 351 études réalisées en climats tempérés.

Tableau 25 - Comparaison de l'effet du labour sans limite de profondeur et avec retournement, du TCS et des TSL sur la concentration des sols en COS (Haddaway et al. 2017)

Élément évalué	Opérations comparées	Résultat obtenu	Profondeur évaluée
Concentration en SOC	TSL par rapport à TCS	+1,18 g/kg	0-15 cm
Concentration en SOC	TSL par rapport à un labour	+ 2,09 g/kg	0-15 cm
Concentration en SOC	TCS par rapport à un labour	+ 1,30 g/kg	0-15 cm
Concentration en SOC	IT par rapport à HT	- 0,89 g/kg	15-30 cm

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Plus les opérations de travail du sol sont minimisées, plus la macrofaune et la microfaune composant la biodiversité du sol sont préservées. L'activité biologique dans les premiers cm du sol est favorisée par le non labour.

Le labour et le non labour sont tous deux décrits comme améliorant la structure du sol et réduisant les risques d'érosion et de ruissellement. Le labour décompacte sur le court terme les sols tassés par les cultures précédentes, leur permettant de respirer. Cela résulte en une amélioration de l'enracinement et de l'infiltration de l'eau ainsi qu'en une réduction du risque de transfert de pesticides vers les nappes phréatiques. Les systèmes de non labour améliorent à court terme le risque d'érosion et à moyen-long terme la portance et l'infiltration (GUILLEMAN et al. 2003; Guyomard et al. 2013).

Les résidus maintenus à la surface par le non labour minimisent l'impact des gouttes, limitent l'évaporation et maintiennent l'humidité dans le sol. L'humidité conservée est un atout pour les régions sèches, car elle permet de réduire l'irrigation. Dans les régions humides, elle peut entraîner une augmentation de la prolifération de maladies (Guyomard et al. 2013).

2. Remarques

Le choix d'un type de travail du sol et les effets qui en découlent dépendent fortement de la nature et l'état physique du sol (texture humidité, perméabilité et degré de tassement). Par exemple, les risques de fragmentation du sol, d'exposition à la pluie, d'érosion, et de battances peuvent s'accroître sur un sol sensible, caillouteux ou à forts coteaux. A l'inverse, les TCS et TSL risquent de réduire la porosité et d'accroître la compaction, le tassement et la présence d'ornières dans un sol sensible au tassement. La nature et les quantité de matières à enfouir (amendements, résidus de la culture précédente, adventices), les risques associés au climat (sécheresse, pluie battante, probabilité de gel), les exigences de la culture à implanter (taille de la semence, sensibilité des racines à la structure du sol), ainsi que les risques phytosanitaires liés à la présence d'éléments rémanents ou d'agents pathogènes liés au sol ou aux résidus de la culture précédente sont à prendre en compte dans le choix d'opérations adaptées au contexte de la parcelle (GUILLEMAN et al. 2003; Guyomard et al. 2013).

Il est possible de réduire la fréquence d'un labour en le pratiquant avant une culture exigeante vis-à-vis de l'état structural du sol, ou après une culture présentant de forts risques de création d'ornières ou de tassements plutôt que de le réaliser systématiquement. Cela permettrait de bénéficier de ses avantages sur l'aération du sol, l'enfouissement des semences d'adventices. Les coûts de production liés à la consommation de carburant et à la mécanisation seraient réduits, tout comme les émissions de CO₂ et la charge de travail. Le recours aux pesticides et aux engrais serait amoindri par rapport aux TCS et TSL effectués de façon systématique, tout comme les risques de tassement et de formation de croûtes de battance (Guyomard et al. 2013).

Un lien peut être fait entre l'avènement des TCS et TSL et le développement d'herbicides totaux remplaçant l'action du labour sur la gestion des adventices. Le développement de ces pratiques à grande échelle sur le continent américain a été renforcé par la mise au point de plantes OGM (Organismes Génétiquement Modifiés) résistantes aux herbicides. Des problèmes de résistances aux pesticides liés à l'utilisation de ces plantes sont soulevés (Guyomard et al. 2013).

3. Bilan

La gestion des bio-agresseurs, des adventices en particulier, et de la fertilisation est un enjeu lorsque l'on réduit le travail du sol. Une potentielle augmentation du recours aux intrants pesticides et engrais peut avoir lieu pour faire face à ces pressions. Les TCS et TSL améliorent la capacité de rétention d'eau des sols par rapport à un labour.

Bien que la charge de travail, le coût de la mécanisation et du carburant soient réduits en TCS et TSL par rapport à un travail conventionnel du sol, un usage accru d'engrais et de pesticides peut inverser la tendance et augmenter le coût de production. Ceci couplé à une potentielle baisse du rendement, la réduction du travail du sol n'entraîne pas toujours une marge brute supérieure aux systèmes avec labour.

Les TSL réduisent les émissions de CO₂ et augmentent les émissions de N₂O, ainsi que le COS dans les 30 premiers cm du sol. Or la concentration de COS sur le profil total du sol reste la même quel que soit le travail du sol.

Les TSL et TCS sont bénéfiques pour la biodiversité. Des impacts négatifs et positifs peuvent avoir lieu sur la structure du sol, quel que soit le type de travail réalisé. Le choix des opérations est à raisonner selon le contexte pédoclimatique de la parcelle, de la rotation et de la pression des bio-agresseurs.

II. Efficiency de l'usage des intrants

A. Agroéquipement

1. Traitements phytosanitaires

a. Résultats obtenus

Effets de l'agroéquipement sur la dérive, la consommation de pesticides et le coût de production

Choix des pulvérisateurs

L'achat d'un pulvérisateur coûte entre 20 000 et 300 000€ selon le type de pulvérisateur (trainé, automoteur ou porté), le volume de la cuve, la largeur de la rampe, la matière, le poids, le nombre de tronçons et les différentes options (coupe de tronçons par GPS, hauteur de la rampe automatique, *etc.*) (Cultivar 2021). Certains d'entre eux sont munis d'équipements permettant de réduire le risque de dérive et limitant la consommation de pesticides.

Les pulvérisateurs sous-foliaires permettent de réduire les quantités de pesticides consommées jusqu'à 80%. Les pulvérisateurs anti-dérives permettent de réduire la dérive jusqu'à 50% par rapport aux pulvérisateurs classiques. Ces solutions sont décrites comme simple d'utilisation, facile d'entretien et économique. Il est néanmoins difficile de trouver des données quantifiées attestant cela (OFAG 2019).

Si le renouvellement d'un nouveau pulvérisateur n'est financièrement pas envisageable, il est possible de moderniser les appareils en changeant certains composants, dits rétrofits, s'ils sont compatibles avec le reste de l'appareil. A titre d'exemple, investir dans une coupe de tronçons rétrofit coûte entre 5 000 et 10 000 € selon les options choisies et la nécessité de remplacer l'électronique. L'ajout d'un débitmètre au remplissage ou une jauge électronique, qui permettent de maîtriser les quantités de bouillies préparées coûte entre 650 et 750€. Le changement d'une régulation DPM (Débit Proportionnel au Moteur) à une régulation DPAE (Débit Proportionnel à l'Avancement à contrôle Electronique) coûte entre 1 500 et 2 500 €. Selon le retour d'agriculteurs, un tel remplacement améliore leur confort de travail et permet de réduire jusqu'à la moitié les quantités de bouillies appliquées (des quantités de fongicides et de pesticides réduction de 150 à 60-70L/ha) (David Laisney 2020).

Les pulvérisateurs avec des rampes à assistance d'air plaquent les gouttelettes de produit sur leur cible. Selon les constructeurs, ces pulvérisateurs permettent de réduire de plus de 66% le risque de dérive. Couplées à des buses anti-dérives, ces rampes permettent des réductions de la dérive de l'ordre de 75 à 100%. Une réduction de 17 à 30% de matière active a lieu dans des conditions de sol nu ou de plantes basses. Ils estiment obtenir des réductions plus importantes sur des plantes denses, grâce à une meilleure pénétration et couverture de la pulvérisation. Ces rampes augmentent le prix des pulvérisateurs de 30% par rapport aux pulvérisateurs classiques. Selon les modèles et les constructeurs, elles ont un surcoût qui varie entre 9 000 et 30 000€ (Perriot and Gaudillat 2013; Lecocq 2016; 2019).

Le choix des buses

Les buses sont des pièces particulièrement importantes lors de la pulvérisation. Selon leur type, elles influencent différemment la taille des gouttelettes et le taux d'application du produit sur la culture cible. Plus les gouttelettes sont grosses plus le risque de dérives est limité mais moins la pulvérisation est homogène et donc efficace ("Comment Réduire Sa Dérive Grâce à Vos Buses?" n.d.). Le type de produit, leur densité, la vitesse et le rendement de chantier désiré, la taille de la goutte souhaitée, la culture cible et les conditions météo sont tout autant de facteurs qui entrent en compte dans le choix du type de buses ("Comment Réduire Sa Dérive Grâce à Vos Buses?" n.d.) L'enjeu est donc d'ajuster au maximum la taille de la gouttelette en tenant compte de ces paramètres, sans pour autant affecter la qualité de la pulvérisation (Lecocq 2016).

Le Tableau 26 présente l'efficacité des principaux types de buse sur la réduction de la dérive et sur la consommation de produits phytosanitaires. Les buses à injection d'air sont considérées comme le moyen le plus accessible et le plus polyvalent pour réduire la dérive. Elles peuvent néanmoins entraîner une augmentation du volume de produit pulvérisé. Ce sont les buses classiques basse pression, les buses de type miroir et les pastilles de calibrage qui assurent, en moyenne, une réduction de la consommation de pesticides (Jaunard 2020; Perriot and Gaudillat 2013). Le coût des buses représente moins d'un pourcent du coût d'un pulvérisateur ("Comment Réduire Sa Dérive Grâce à Vos Buses?" n.d.).

Tableau 26 - Efficacité des principaux types de buse sur la réduction de la dérive et sur la consommation de produits phytosanitaires (Jaunard 2020; Perriot and Gaudillat 2013)

Modèle de buse	Pourcentage de réduction de la dérive (Jaunard 2020)	Volume moyen consommé (l/ha)	Comparaison du volume moyen consommé par rapport à une buse à fente classique
Fente classique	0% 50% pour les calibres 05 et 06	114	
Fente classique basse pression		89	-22%
Pastille de calibrage	50%	111	-3%
Injection d'air classique	50 à 90%	132	+16%
Injection basse pression	50 à 90%	121	+6%
Miroir classique	50 à 75%	104	-9%
Miroir à injection d'air	50 à 100%		

Réglages

La taille des gouttelettes peut aussi varier en fonction de la pression du liquide et du volume appliqué par hectare. Il est également possible de jouer sur la pression de l'air projeté lorsque le pulvérisateur est équipé de rampes à assistance d'air (Lecocq 2016).

L'ajustement de la hauteur et de la vitesse d'avancement sont d'autres facteurs permettant de limiter les risques de dérive.

Effets sur le temps de travail

Ces équipements cherchent en premier lieu à réduire le risque de dérive et, pour certains, à réduire les quantités de pesticides épandus. Ils n'influencent pas le temps de travail mais en améliorent les conditions et réduisent la pénibilité de ces tâches.

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Ces équipements n'ont pas d'effet sur les émissions de CO₂ directes ni sur la séquestration de carbone. Une réduction des émissions de CO₂ indirectes peut avoir lieu lorsque les volumes de produit consommé sont réduits. Cela peut avoir lieu grâce à l'utilisation de pulvérisateurs sous-foliaires, au passage d'une régulation DPM à une régulation DPAE, aux pompes à assistance d'air ou aux buses basse pression.

Effets sur le sol, l'air, l'eau et la biodiversité

Une moindre dérive, voire une réduction du volume de produit pulvérisé joue en faveur de l'eau et de l'air.

b. Bilan

Parmi la diversité des pulvérisateurs existants, les pulvérisateurs sous-foliaires et les pulvérisateurs antidérive réduisent les risques de dérive et pour certains les quantités de pesticides appliquées. Il est possible de moderniser quelques composants des appareils, lorsque l'investissement dans un nouveau pulvérisateur n'est pas envisageable. Les buses influencent aussi la qualité de la pulvérisation et le risque de dérive. Celles de type basse pression réduisent le volume de produit pulvérisé. Les buses anti-dérives sont le moyen le plus polyvalent et le plus accessible pour réduire le risque de dérive. Leur choix est conditionné par de multiples facteurs. Les réglages de la hauteur et de la pression du matériel ainsi que de la vitesse d'avancement sont d'autres moyens de réduire le risque de dérive et le volume de produit pulvérisé. Ces équipements et réglages limitent l'impact de la pulvérisation sur la qualité de l'air et de l'eau. Si les quantités de pesticides sont réduites, ils limitent les émissions de CO₂ indirectes. Ils assurent également un gain de confort aux agriculteurs.

2. Irrigation

a. Modernisation des systèmes d'irrigation

Aujourd'hui 80% de l'irrigation se fait par irrigation de surface avec des systèmes sous pression, très consommateurs d'eau. Les principaux systèmes d'irrigation en Europe sont : l'irrigation par couverture intégrale, l'irrigation par canon enrouleur, les rampes pivots ou centrales ("Quel Système d'irrigation Choisir ?" 2017).

L'utilisation de systèmes de micro-irrigation, qui sont utilisés dans les vignobles, les vergers et en horticulture, ont été étudiés durant la dernière décennie dans des cultures de plein champ. Ces systèmes conviennent aux cultures à fort écartement comme le maïs, la betterave sucrière ou les pommes de terre. Les systèmes de goutte-à-goutte répartissent l'eau au pied des cultures dans les systèmes de surface ou au niveau des racines pour les systèmes où les tubes sont enterrés à 30 cm de profondeur. Les systèmes enterrés conviennent à des parcelles cultivées en TCS ou en semis direct. La fertigation ou fertirrigation assure une meilleure assimilation des engrais par les cultures en diluant des engrais liquides solubles dans ces systèmes ("Quel Système d'irrigation Choisir ?" 2017; Soto et al. 2019).

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation de l'eau

Le Tableau 27 récapitule les économies d'eau réalisables lors d'un changement de matériel estimé selon (Serra-Wittling and Molle 2017). Ces économies sont principalement réalisées grâce à une réduction du risque de dérive. Elle est bien plus faible pour les pivots basse pression (2% environ) que pour les canons enrouleurs ou que pour la couverture intégrale (10% en moyenne).

Ce sont les systèmes de goutte-à-goutte qui assurent l'économie d'eau la plus importante. Des économies d'eau de 10 à 40% en moyenne sont obtenues par rapport aux autres systèmes d'irrigation. L'efficacité de l'irrigation, le rapport entre la quantité d'eau mise à disposition des racines de la culture et de la quantité appliquée par l'équipement d'irrigation peut atteindre 98% ("Systèmes d'irrigation" n.d.; Carpentier 2014; Le Gonidec 2020; Serra-Wittling and Molle 2017).

Le renouvellement d'un même matériel permet également de réaliser des économies car l'usure fait perdre chaque année l'équivalent d'un à quatre pourcents d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (Serra-Wittling and Molle 2017). L'économie d'eau réalisée grâce au renouvellement d'un enrouleur ou d'un système en couverture intégrale est estimée à 10%. 15 à 20% d'eau peut être économisée lors du renouvellement d'un système d'irrigation de précision (micro-jet ou goutte-à-goutte) (Serra-Wittling and Molle 2017).

Tableau 27 - Économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation en maïs et autres grandes cultures, tableau issu de (Serra-Wittling and Molle 2017)

Economie d'eau (%)	Nouveau				
	Ancien	Enrouleur	Couverture intégrale	Pivot basse pression	Goutte-à-goutte de surface
Enrouleur	10	10	5-20	10-20	15-35
Couverture	--	10	5-20	15-25	20-25
Pivot / Rampe	--	--	5-10	5-15	10-25
Goutte-à-goutte de surface	--	--	--	10-20	15-20
Goutte-à-goutte enterré	--	--	--	--	10-20

Une autre alternative pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation est de réduire la hauteur des buses pour limiter la non-valorisation de l'eau pulvérisée, comme le montre le Tableau 28. Les systèmes d'irrigation à mi-hauteur (mid elevation spray application - MESA) délivrent l'eau à 150 cm de haut environ. Les systèmes d'irrigation à faible hauteur et faible consommation d'énergie (Low Elevation-Energy Precision Application – LEPA, and Low Elevation-Energy Spay Application – LESA) délivrent l'eau à moins de 60 cm du sol, soit sous la canopée (Soto et al. 2019). Un tel système permet une économie de 20% d'eau selon une étude sur 46 ha en Hongrie (SERRA-WITTLING et al. 2020).

Tableau 28 - Efficacité des systèmes d'irrigation selon la hauteur des buses (Soto et al. 2019)

Systèmes	Standard	MESA	LEPA – LESA
Efficacité de l'irrigation	60 %	85%	97%

Ces économies d'eau dépendent de nombreux facteurs comme l'eau disponible dans le sol pour les plantes (réserve utile), le type d'année (sèche, humide...), la culture, les conditions pédoclimatiques etc (Serra-Wittling and Molle 2017).

Effets sur le rendements

Les rendements obtenus suite à un recours aux pivots ou aux rampes d'irrigation ne sont en général pas significativement différents des rendements obtenus avec une irrigation en couverture intégrale ou avec un enrouleur (Serra-Wittling and Molle 2017). L'effet du type de d'irrigation sur le rendement est difficile à isoler, hormis par les notions d'efficacité d'utilisation de l'eau.

Théoriquement, le goutte-à-goutte permettrait de maintenir ou d'augmenter les rendements. Si le maintien ou l'augmentation jusqu'à 3,5% du rendement sont constatés pour certains producteurs de maïs, des pertes de rendements sont aussi observées sur des cultures de pommes de terre, de blé ou de maïs. Des pertes allant jusqu'à 15% ont été observées dans des cultures de maïs, causées par une sous-estimation de l'irrigation lors de la période de floraison ou par un trop gros écartement des goutteurs (Le Gonidec 2020; Chambre d'agriculture des Landes 2017).

Effets sur le temps de travail

Les systèmes de pivot permettent de gagner jusqu'à 95% de temps de travail par rapport aux autres systèmes, comme le montre le Tableau 29. Les systèmes de canons enrouleurs nécessitent 3 h/ha/an de moins que les systèmes de couverture intégrale (Serra-Wittling and Molle 2017). Un gain de temps supplémentaire peut avoir lieu si les systèmes d'irrigation peuvent être activés à distance ou automatiquement ("Quel Système d'irrigation Choisir ?" 2017).

Les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte de surface (GGS) jetables ou récupérables figurent parmi les systèmes d'irrigation les plus chronophages. Le système de goutte-à-goutte enterré (GGE) est le système qui assure le plus de gain de temps après les systèmes de pivot. Il permet de réduire le temps de gestion de l'irrigation de 55 à 75% par rapport aux enrouleurs, à la couverture intégrale et à l'irrigation GGS (Serra-Wittling and Molle 2017).

Tableau 29 - Temps de main d'œuvre total pour une campagne avec différents systèmes d'irrigation en grandes cultures (GGE : goutte-à-goutte enterré, GGS : goutte-à-goutte de surface). D'après Pagliarino (2012) et Arvalis (2017), tableau issu de (Serra-Wittling and Molle 2017)

Besoin en temps	GGE	GGS récupérable	GGS jetable	Enrouleur	Pivot	Couverture intégrale
(h/ha/an)	3	12	9,5	6,6	0,2	9,5
Comparaison avec l'enrouleur (%)	-55%	+82%	+44%	---	-97% ??	+44%
Comparaison avec la couverture intégrale (%)	-68%	-26%	0%	-31%	-98%	---
Comparaison avec le GGS récupérable (%)	-75%	---	-21%	-45%	-98%	-21%
Comparaison avec GGS jetable (%)	-68%	-26%	---	-31%	-98%	0%

Effets sur le coût de production

Les pivots ou les rampes d'irrigation demandent un investissement plus conséquent qu'un système d'irrigation par couverture intégrale ou par enrouleur. A titre d'exemple, l'installation de rampes d'irrigation a coûté 72 141€ lors d'une expérimentation sur 46 ha en Hongrie. Certains fournisseurs indiquent des coûts qui avoisinent 35 000€ ("Top Sale Center Pivot Irrigation System In Europe" n.d.). Ces investissements sont à relativiser car la durée de vie de ces systèmes peut atteindre 20 ans (Serra-Wittling and Molle 2017).

Grâce à leur faible pression, les pivots ou les rampes d'irrigation permettent des économies d'eau et d'énergie, ce qui permet de réduire le coût de production (Serra-Wittling and Molle 2017).

L'investissement relatif à la mise en place d'une micro-irrigation de surface coûte entre 1 200 et 1 500 €/ha pour un système en surface. A cela s'ajoutent entre 205 et 400€/ha/an liés au renouvellement des tuyaux. Celui d'une irrigation souterraine coûte entre 2 500 et 4 500 €/ha (Deumier et al. 2014). Selon les estimations d'Arvalis (Deumier et al. 2014) présentées Tableau 30, l'irrigation goutte-à-goutte souterraine serait plus rentable que l'irrigation GGS. Ces solutions restent néanmoins deux à trois fois plus élevées que les enrouleurs ou les pivots.

Le retour sur investissement d'un système de surface est compris entre 700 et 3 000 €/ha selon la distance entre la terre irriguée et la source d'eau. Il se fait en deux ou trois ans. Les systèmes d'irrigation souterrains ont un retour sur investissement de 7 ans en moyenne. Ces deux types de système ont une durée de vie estimée à 20 ans (Le Gonidec 2020; "Systèmes d'irrigation" n.d.; Carpentier 2014).

Tableau 30 - Investissements et charges de différents systèmes d'irrigation. Les installations d'irrigation par goutte-à-goutte, tableau issu de (Deumier et al. 2014)

Type de matériel	Goutte-à-goutte enterré avec lignes de goutteurs plats	Lignes de goutteurs cylindriques récupérables de surface	Lignes de goutteurs plats récupérables de surface	Gaine souple d'irrigation de surface	Enrouleur	Pivot
Investissement valeur à neuf (en €)	118 900	115 590	54 870	45 900	40 590	46 650
Investissement valeur à neuf (en €/ha)	3 963	3 853	1 829	1 829	1 353	1 555
Charges fixes ¹ (en €/ha/an)	659	692	571	767	167	220
Charges opérationnelles (en €/ha/an)	37	37	37	37	61	74
Charges de main d'oeuvre ² (en €/ha/an)	14	147	189	133	92	5
Charges totales, matériel en cours d'amortissement (en €/ha/an)	710	866	830	937	320	299

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Comme le montre le Tableau 31, les rampes et pivots d'irrigation ont une meilleure efficacité énergétique que les canons enrouleurs. Les systèmes d'asperseurs basse pression sur un pivot permettent des économies de 15 à 90% d'énergie (Serra-Wittling and Molle 2020). Les cannes de descente des asperseurs des systèmes LESA permettent également d'accroître l'efficacité énergétique jusqu'à 80% environ (Soto et al. 2019).

Des économies d'énergie allant de 43 à 80%, de 40 à 60% et de 10 à 50% ont été respectivement observées lors de l'utilisation de goutte-à-goutte par rapport à l'utilisation de canons enrouleurs, de systèmes de couverture intégrale et de systèmes de pivots et de rampes (Serra-Wittling and Molle 2020).

Une faible différence d'efficacité énergétique est constatée lors du renouvellement d'un même équipement. Mais il est possible de gagner des pourcentages d'efficacité énergétique en ajustant certaines pièces. On peut, par exemple, gagner 18 à 36% d'efficacité énergétique en jouant sur la taille de la buse des canons enrouleurs. De même, un gain de 22 à 37% d'efficacité énergétique peut être obtenu en adaptant le diamètre du tube (Serra-Wittling and Molle 2020).

Tableau 31 - Ordre de grandeur des économies d'énergies réalisables en grande culture (Serra-Wittling and Molle 2020)

Économie d'énergie	Couverture intégrale	Pivot et rampe	Goutte-à-goutte
Par rapport à un enrouleur	32%	40% (de 29 à 50%)	70% (de 43 à 80%)
Par rapport à une couverture intégrale			50% (de 40 à 60%)
Par rapport à des pivots ou des rampes			30% (de 10 à 50%)

ii. Remarques

Investir dans des équipements plus modernes qui permettent d'économiser de l'eau n'induit pas toujours une réduction de la consommation d'eau. C'est le choix de la conduite de l'irrigation qui influence en premier lieu la consommation d'eau. De nombreux exemples illustrent cela en Europe et dans le monde. On parle « d'effet rebond » suite au passage d'une irrigation gravitaire à une irrigation goutte-à-goutte ou suite à la modernisation d'un système pivot traditionnel à un système plus efficient (Serra-Wittling and Molle 2020). C'est pourquoi le rapport de (Serra-Wittling and Molle 2020) insiste sur l'importance de la conduite d'irrigation, en particulier avec l'appui d'OAD pour améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau.

L'irrigation goutte-à-goutte permet de réduire le développement d'adventices entre les rangs. Des dégradations des tuyaux par des nuisibles, des campagnols pour les systèmes souterrains ou par les sésamies ou pyrales pour les systèmes de surface peuvent avoir lieu. Même si des systèmes de filtres sont mis en place dans l'irrigation souterraine, les tuyaux ont toujours un risque de se faire obstruer.

iii. Bilan

En Europe, l'irrigation est réalisée en majorité par des systèmes d'aspersion fonctionnant sous pression et qui sont donc très consommateurs d'eau. Parmi les systèmes d'irrigation par aspersion, les pivots et les rampes d'irrigation assurent la meilleure efficience d'utilisation de l'eau. Ils réduisent la consommation d'eau et d'énergie tout en maintenant le rendement. Ce sont les systèmes les moins chronophages. Ils ont un coût plus élevé que les systèmes d'irrigation par enrouleur ou par couverture intégrale.

Les systèmes goutte-à-goutte arrivent depuis une décennie dans les cultures à fort écartement comme le maïs ou la betterave sucrière. Il s'agit de l'irrigation la plus efficiente tant au niveau de l'utilisation d'eau qu'au niveau énergétique. L'écartement des goutteurs et les volumes d'eau à appliquer doivent être définis avec précision sans quoi les rendements peuvent être impactés. La gestion du GGE est bien moins chronophage que celle du GGS, mais elle est beaucoup plus coûteuse à mettre en place. Ces systèmes sont deux à trois fois plus chers que les systèmes de rampes frontales et de pivots ou que les enrouleurs.

Des effets faux rebonds sur la consommation d'eau peuvent avoir lieu suite à l'installation d'un nouveau système ou à la modernisation du système d'irrigation existant si la conduite de l'irrigation n'est pas adaptée. Les systèmes d'irrigation goutte-gouttes sont sensible aux risques de dégradation et d'obstruction.

b. Autres

i. Le pompage et le transport d'eau

Une modernisation des infrastructures liées au transport de l'eau de la source à la parcelle couplée à un système d'irrigation permettrait d'économiser 10 à 35% d'eau dans le pourtour de la méditerranée selon (Fader et al. 2016). Jusqu'à 45% d'économies d'énergie peuvent être réalisées en augmentant le débit et en réduisant la pression au niveau de la pompe (Serra-Wittling and Molle 2017).

L'installation de variateurs permet de réduire jusqu'à 30% sa consommation d'énergie et jusqu'à 7% sa consommation d'eau (Serra-Wittling and Molle 2017).

ii. Le choix des buses

Le choix du type de buse influence également l'efficacité. Par exemple, plus une goutte d'eau d'irrigation est grosse, moins il y aura de risque de perte avec le vent. Un changement de buse vers des modèles plus appropriés permettrait d'économiser 5% d'eau pour une rampe ou un pivot (Serra-Wittling and Molle 2017).

Des contrôleurs de vitesse de rotation des buses permettrait d'économiser 15% d'eau selon (Serra-Wittling, Molle, and Cheviron 2019).

iii. Autres équipements

D'après l'IRSTEA, on peut attendre une économie d'eau réalisable avec des brises jet et des angles réglables sur les canons de 5 à 10 % (Serra-Wittling and Molle 2017).

3. Direction assistée et système de gestion d'une circulation raisonnée

La direction assistée des tracteurs en grandes cultures permet de réduire les risques de chevauchement ou d'interruption des pulvérisations liés à la déviation de la trajectoire lors du traitement. Associée aux données des trajets et des traitements des années antérieures, les systèmes de gestion d'une circulation raisonnée ou « Controlled Traffic Farming » (CTF) tendent à réduire la compaction et la dégradation des sols (Balafoutis et al. 2017). Ces outils fonctionnent à partir des informations données par des OAD (Outils d'Aides à la Décision).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

D'après une enquête menée auprès de 971 agriculteurs européens, l'usage d'engrais azotés peut être réduit de 3% en moyenne lors de l'utilisation de la direction assistée. Or comme le montre la Figure 3, plus de la moitié des agriculteurs interrogés n'ont pas noté d'effet sur la consommation d'engrais azotés lors de l'utilisation de cette technologie (Soto et al. 2019).

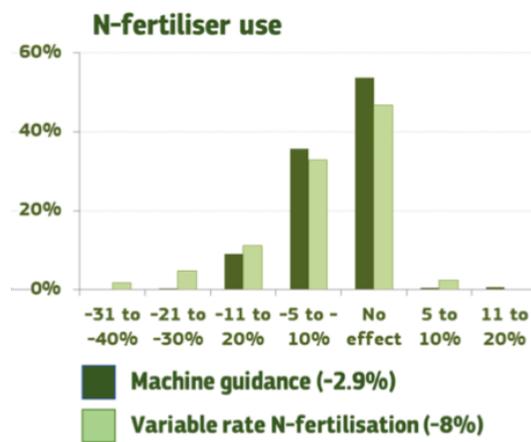


Figure 3 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (Machine guidance) et de la pulvérisation de précision (Variable rate N-fertilisation) sur l'utilisation d'engrais azotés. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de (Soto et al. 2019)

Des réductions supplémentaires de 3 à 5% des pesticides et jusqu'à 15% des engrais sont possibles avec l'utilisation de systèmes de CTF (Soto et al. 2019).

Effets sur le rendement

La direction assistée n'a, en moyenne, pas d'effet sur le rendement, comme le montre les résultats d'une enquête auprès d'agriculteurs illustrée Figure 4.

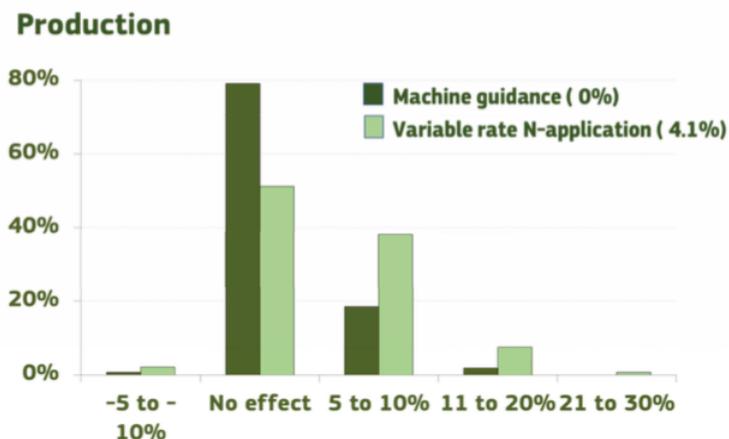


Figure 4 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (Machine guidance) et de la pulvérisation de précision (Variable rate N-fertilisation) sur le rendement. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de (Soto et al. 2019)

Les systèmes CTF permettent des augmentations du rendement de 4% et 7,5% pour les cultures de blé et de colza. Ces augmentations peuvent aller jusqu'à 15% (Soto et al. 2019).

Effets sur le temps de travail

Le recours à la direction assistée induit une diminution du temps de travail bien plus conséquente (6,2%) que pour l'ajustement des quantités d'intrants par l'agriculture de précision (1,6%). Associée à un faible temps de formation (1,3% supplémentaire) et à une gestion du système peu contraignante (0,27% supplémentaire), la direction assistée permet un gain de temps de 4,5% (Soto et al. 2019). En plus de ce gain de temps, la direction assistée améliore les conditions de travail des agriculteurs.

Effets sur le coût de production

Une économie de 2,1% de la main d'œuvre peut avoir lieu grâce au gain de temps que permet la direction assistée. La consommation de carburant réduit d'en moyenne 5,4% et peut atteindre une diminution de 10,4%. Associée à une légère diminution de la quantité d'engrais, la direction assistée réduit le coût des intrants. Peu de frais contractuels supplémentaires (0,3%) sont liés à la direction assistée car aujourd'hui la majorité des engins agricoles commercialisés ont cette option. Tous les avantages sur le coût de production ne compensent pas toujours l'investissement lié à cette technologie. Le recours à la direction assistée induit un effet sur la marge brute compris entre - 18€/ha et + 34€/ha. Entre 40 et 47% des agriculteurs perçoivent un retour sur investissement en moins de 5 ans. Parmi les autres, 25% estiment que le retour sur investissement a lieu sur des périodes supérieures à 11 ans (Soto et al. 2019).

Les systèmes CTF permettent une réduction de 25 à 35% du carburant dans les cultures de céréales. Une économie d'environ 70% de temps et d'énergie a lieu. Ces systèmes sont de plus en plus intégrés dans les engins agricoles neufs. Ils permettent jusqu'à 14% de retour sur investissement et 8% de bénéfice en Europe. Une augmentation de la marge brute entre 57 et 115€/ha peut être constatée (Soto et al. 2019).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les réductions de la consommation de carburant que permettent la direction assistée et les systèmes CTF engendrent une réduction des émissions directes de CO₂. De même, les réductions des quantités d'engrais utilisées diminuent les émissions indirectes de CO₂ et les émissions de N₂O (Soto et al. 2019). D'après une étude modélisant l'effet de la direction assistée sur les émissions de GES à l'échelle européenne, ces technologies peuvent réduire entre 1 513 et 2 760 kT eCO₂/an, ce qui correspond à 0,3% des émissions totales de GES du secteur agricole en 2015 (Soto et al. 2019).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Ces technologies permettent une moindre compaction du sol, ce qui résulte en une augmentation de sa porosité et donc de sa perméabilité. Le potentiel du sol à retenir, stabiliser et dégrader les pesticides est accentué, améliorant ainsi la qualité de l'eau qui s'infiltré vers les nappes phréatiques. Cela assure le maintien de zones d'habitats naturels pour la faune (Balafoutis et al. 2017).

b. Bilan

La direction assistée et les systèmes CTF permettent de réduire la consommation d'engrais et de carburant et d'alléger les charges de travail. Cela induit une diminution des émissions de N₂O ainsi que des émissions directes et indirectes de CO₂. La direction assistée a un effet mitigé sur la marge brute. Le retour sur investissement mentionné par les agriculteurs s'étend sur une période très large. Les systèmes CTF permettent une potentielle augmentation du rendement ce qui assure une augmentation de la marge brute et un retour sur investissement plus rapide. Ces deux technologies améliorent l'état du sol, la qualité de l'eau et favorisent la présence d'habitats naturels.

B. Agriculture de précision

L'agriculture de précision, par le biais d'OAD propose un ajustement des pratiques agricoles en fonction des conditions mesurées (sols, conditions climatiques, type de culture...). Les OAD peuvent être associés à des outils de modulation des doses ou à des robots automatiques. Les outils de modulation des doses correspondent aux méthodes d'application des doses variables d'intrants et de la direction assistée des tracteurs. Ils ajustent les doses et leur localisation selon les besoins des cultures (Farm Europe 2019).

Comme le montre la Figure 5, les outils digitaux liés à la production végétale peuvent être classés en 5 niveaux selon leur degré de précision, le matériel nécessaire et leur coût. Les OAD traitant les informations issues de capteurs, stations météo, images satellites et caméras sont présents à chaque niveau. Ils sont détaillés à partir de la page 76. A partir du troisième niveau, en grandes cultures, ces outils sont associés aux outils de modulation des doses. Ils sont traités à partir de la page 81. Les niveaux 4 et 5 additionnent aux outils des niveaux précédents la robotisation comme alternative aux pesticides pour la gestion des bio-agresseurs (Farm Europe 2019). Les robots de désherbage chimique sont traités à partir de la page 89 et les robots de désherbage mécanique sont traités à partir de la page 97.

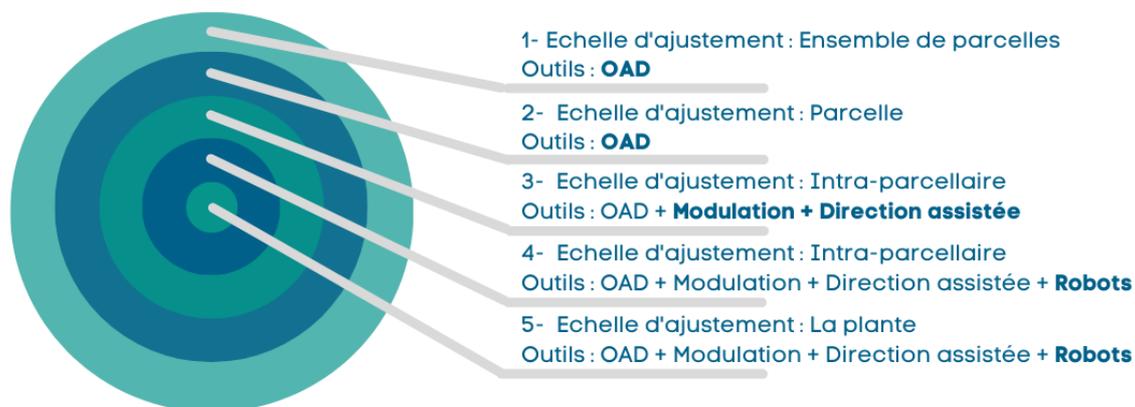


Figure 5 – Les cinq niveaux de l'agriculture digitale

1. Outils d'aide à la décision

Les OAD sont des outils de diagnostic, d'évaluation des risques, ou de conseil qui proposent des solutions adaptées au contexte agronomique et pédoclimatique de la parcelle sur :

- Le choix du produit (doses, concentrations, choix de la substance active, mélanges de produits) ;
- Le traitement (date, localisation, choix de matériel et réglage) ;
- Les pratiques complémentaires (choix variétal, rotations, méthodes préventives...).

Cette partie se concentre sur les OAD aidant à raisonner l'utilisation d'intrants (pesticides, engrais et eau). Les résultats présentés dans cette partie correspondent aux prescriptions d'intrants réalisées par les OAD et aux rendements obtenus suite aux préconisations.

Pour estimer le risque de pression sanitaire, nutritive ou hydrique et adapter leurs préconisations, les OAD se basent sur l'historique de la parcelle, du précédent cultural, du type de sol, du climat. Ces informations sont renseignées par les agriculteurs, mesurées par images satellites et en temps réel via des capteurs, des caméras, des stations météorologiques (Farm Europe 2019).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation des intrants

Pesticides

Comme le montre le Tableau 32, les charges liées à l'utilisation des pesticides sont réduites en moyenne de 8,5 à 32,5% grâce aux prescriptions des OAD. Cela permet une économie pouvant aller jusqu'à 10€/ha en moyenne en Europe (Farm Europe 2019).

Tableau 32 - Économies moyennes des charges liées aux pesticides permises par les prescriptions des OAD (Farm Europe 2019)

Culture	Économies moyennes des charges liées à la gestion des bio-agresseurs permises par les prescriptions des OAD	
	(%)	€/ha
Betterave	8,49	4,44
Blé tendre	16,67	7,01
Blé dur	26	10,92
Coton	32	97,27
Orge	32,5	1,44
Pommes de terre	6,47	35,52

Engrais

En grandes cultures, les OAD permettent, selon les cultures, d'économiser entre 7,65 et 65% d'intrants en moyenne par rapport à leur non utilisation, comme le montre le Tableau 33. Les charges liées à la fertilisation peuvent être réduites entre 5,88 et 19,58% en moyenne, ce qui se traduit en une économie de charges pouvant aller jusqu'à 152,63€/ha. Il peut arriver que le coût de l'OAD soit supérieur au coût des intrants économisés, ce qui induit une augmentation des charges de travail, comme le montre le cas du blé.

Tableau 33 - Économies moyennes des charges liées à la fertilisation permises par les prescriptions des OAD en Europe (Farm Europe 2019)

Culture	Quantités de nutriments économisées en moyenne		Charges liées à la gestion de la fertilisation économisées en moyenne	
	(%)	€/ha	(%)	€/ha
Blé	7,65	9	5,88	- 2,13
Colza	16	34,08	8,38	18,26
Coton	41,32	92,42	7,19	152,97
Orge	Pas de différences significatives			
Pommes de terre	65 (78 kg N/ha, 162,71 kg P et 188,65 kg K/ha)		19,58	152,63

Eau

L'irrigation peut être ajustée de façon manuelle à partir des cartes de prescription des OAD. Un tel ajustement est effectué de façon uniforme par zone voire sur l'ensemble de la parcelle. Un ajustement plus fin peut être réalisé de façon automatique, avec les techniques d'irrigation à taux variable (VRI), décrites page 85. Les prescriptions des OAD sur l'irrigation sont comparées à des systèmes irrigués sans OAD.

Si certaines études comparant l'irrigation de précision à une irrigation sans OAD observent une économie d'eau, la mise en place d'une irrigation de précision peut engendrer une augmentation de la consommation d'eau pour pallier le besoin hydrique des cultures, selon les conditions climatiques et météorologiques. L'effet de l'irrigation de précision sur la consommation d'eau est l'information la plus diffusée, or ce n'est pas tant la consommation d'eau qui importe, mais l'efficacité d'utilisation de l'irrigation.

C'est autour de la méditerranée que l'irrigation de précision a le plus grand potentiel. La consommation d'eau et d'énergie est réduite de 10 à 14% en moyenne (FIGARO Irrigation Platform 2016). Les prescriptions des OAD permettent d'économiser jusqu'à 32,5% de l'eau irriguée en culture de pommes de terre, soit 1220 m³/ha en moyenne. Cela induit une réduction de 27,5% des charges liées à l'irrigation soit 107,50€/ha.

Une économie de 43% d'eau est aussi observée pour les cultures de coton, ce qui représente en moyenne 930 m³/ha et près de 700€/ha de charges en moins. Une économie de 40€/ha peut avoir lieu en culture de maïs (Farm Europe 2019). Selon (Serra-Wittling and Molle 2017), l'usage de capteurs et de sondes tensiométriques permet des économies d'en moyenne 20 à 25 % qui vont de 8 à 41%. Un pilotage tensiométrique a permis des économies d'eau de 16 à 41% pour des cultures de pommes de terres. L'usage d'un dendromètre assure jusqu'à 30% d'économie d'eau supplémentaire par rapport à un tensiomètre seul. Une cartographie du la réserve utile d'un sol permet d'apprécier l'hétérogénéité de réserve utile de la parcelle. Elle assure des réduction de la consommation d'eau allant jusqu'à 66%, soit 200 m³/ha sans qu'il y ait de perte de rendement (Serra-Wittling and Molle 2017). Ces auteurs affirment également que l'efficacité globale d'un pivot pourrait augmenter de 10 à 25% par optimisation du pilotage.

Une économie de 18% d'eau est constatée en moyenne pour des cultures de coton en micro-irrigation (Stamatiadis 2013). En Grèce, l'irrigation peut être réduite de 5 à 34%, mais impacte le rendement de façon très variable, comme le décrit la partie sur l'irrigation à taux variable, page 86. En conséquence, l'efficacité de l'irrigation varie de -12% à 97% (Soto et al. 2019).

Effets sur le rendement

Les prescriptions des OAD peuvent induire une augmentation du rendement variant en moyenne entre 0,2 et 4,7 q/ha, ce qui peut induire une augmentation du produit brut variant entre 3 et 68€/ha, comme le montre le Tableau 34. Néanmoins, (Soto et al. 2019) souligne l'effet variable de l'irrigation de précision sur le rendement, allant de - 18 à + 31%. Selon les différents retours de terrain décrits par Serra-Wittling and Molle (2017) le pilotage de l'irrigation n'a pas d'effet significatif sur les rendements.

Tableau 34 - Effets des OAD sur les rendements et les produits bruts en moyenne (Farm Europe 2019)

Culture	Rendements moyens obtenus les prescriptions des OAD.		
	Intrant concerné par les prescriptions	Rendement supplémentaire moyen obtenu suite aux prescriptions des OAD (q/ha).	Produit brut supplémentaire moyen obtenu suite aux prescriptions des OAD €/ha.
Betterave	Pesticides	2	15
Blé tendre	Pesticides	4,7	65,8
Blé dur	Pesticides	0,2	3
Orge	Pesticides	1,3	19,5
Blé	Engrais	3,93	41,23
Orge	Engrais	3,5	52,50
Colza	Engrais	1,43	58,90

Une augmentation de 10% du rendement est constatée dans des cultures de coton en fertigation (Skakelja and McGlynn 2018).

Effets sur le temps de travail

Les producteurs d'OAD revendiquent la simplicité des interfaces et le gain de temps qu'ils entraînent grâce à la réduction des applications d'engrais et de pesticides (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). Or le temps nécessaire pour se former à leur utilisation et pour les prendre en main peut freiner des agriculteurs à les utiliser (Zhai et al. 2020).

Effets sur le coût de production

Certains OAD sont gratuits. Ceux qui prescrivent les quantités d'intrants à épandre à partir de capteurs et d'images satellites des cultures ont un coût maximum de 20€/ha/an (Farm Europe 2019). Comme le montre le Tableau 33 Tableau 34, ils sont généralement rentabilisés par la réduction de la quantité d'intrants consommée ou par l'augmentation du rendement. La marge brute est généralement supérieure à celle obtenue sans utilisation d'OAD lorsque l'on additionne les produits bruts et les économies de charges liées à la gestion des intrants, coût des OAD compris. Des produits bruts moyens sont donnés, à titre d'exemples, dans le Tableau 34. Une augmentation de la marge brute comprise entre 12 et 45€/ha a été observée pour les cultures d'orge et de blé lors de l'utilisation d'OAD ajustant les doses d'engrais et de pesticides (Farm Europe 2019). Jusqu'à 310€/ha/an de bénéfices ont été obtenus lors de l'application en fertigation des doses d'engrais prescrites par zone d'après une carte des besoins azotés pour des cultures de coton (Skakelja and McGlynn 2018).

Les OAD dépendent des données climatiques et météorologiques. Selon les types d'OAD utilisés, les agriculteurs peuvent avoir à mettre en place des stations météorologiques. Les stations météo demandent un investissement compris entre 400 € et 2 000 € (Weenat, 2020, communication personnelle). Ces stations peuvent être gérées et bénéficiées aux organismes suivant les agriculteurs, à un agriculteur isolé ou à un groupe d'agriculteurs suffisamment proches géographiquement.

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Il est reconnu que l'utilisation de cartographies des besoins des intrants permet une gestion plus efficiente des intrants, induisant ainsi de moindres émissions de GES liées à la consommation de pesticides, d'engrais, de carburant et d'électricité (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021).

En fertigation, l'augmentation des rendements permet une augmentation de l'efficacité de l'énergie de l'ordre de 20% (Stamatiadis 2013).

Les cultures irriguées émettent plus de N₂O que les cultures non irriguées. Cette augmentation se situe entre 50 et 140%. L'irrigation de précision permettrait de réduire ces émissions si elles induit une réduction des quantités d'eau utilisées (Soto et al. 2019).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Peu d'études analysent l'effet des OAD sur les dimensions environnementales. On peut poser l'hypothèse qu'une réduction des quantités de pesticides appliquées joue en faveur de la biodiversité. Une réduction des quantités de pesticides et/ou d'engrais devrait également améliorer la qualité de l'air, du sol et de l'eau grâce à un moindre risque de lixiviation et une plus faible présence de molécules toxiques.

b. Remarques

L'utilisation d'OAD dont les préconisations sont réalisées à partir d'images satellites est encore peu généralisée aujourd'hui. A titre d'exemple, de tels OAD sont utilisés dans 15% des exploitations grande culture en France (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). La multiplication de services similaires et la concurrence vont faire chuter les prix dans les années à venir, entraînant ainsi leur démocratisation.

c. Bilan

De nombreux OAD préconisent les doses de pesticides et d'engrais à épandre à partir de cartographies du sol et de stations météo. Suggérant quand agir, ils aident à la gestion des intrants et au changement de pratique. Ils assurent leur utilisation efficiente en réduisant les doses d'intrants sans compromettre le rendement. Ces réductions sont variables selon les localisations, les années, les conditions pédologiques et climatiques ainsi que selon la pression sanitaire.

L'impact des OAD quels qu'ils soient sur le temps de travail est difficile à quantifier. Le temps de travail pourrait augmenter lors de leur prise en main. Un retour sur investissement se produit grâce à l'élévation de la marge brute liée à une réduction de la consommation d'intrants et à une potentielle augmentation du rendement. Leur apport dans l'adaptation et la lutte contre le changement climatique et dans la préservation de l'environnement se limite à une réduction des émissions de GES ainsi qu'à une baisse de la pollution des eaux. Ces outils encore peu démocratisés assurent un pas supplémentaire vers le respect des réglementations environnementales.

2. Application de doses d'intrants ajustées et localisées

Les pulvérisateurs de précision adaptent l'ouverture et la fermeture de leurs buses à partir d'une cartographie des besoins ou à partir de données provenant de caméras embarquées. Les plus précis peuvent jouer sur les quantités d'intrants pulvérisés selon les besoins des cultures. Ils ont un coût plus conséquent que les pulvérisateurs standards (Zarco-Tejada, Hubbard, and Loudjani 2014). Ces techniques se démocratisent. Aujourd'hui 70 à 80% des agroéquipements commercialisés possèdent des composants liés à l'agriculture de précision.

a. Résultats obtenus

i. Ajustement des traitements phytosanitaires

Les herbicides sont les pesticides pour lesquels l'efficacité de l'agriculture de précision a été le plus testée. Ces informations recueillies ne concernent que les produits liquides et non les poudrages.

Effet sur l'utilisation des pesticides

Les pulvérisateurs de précision peuvent réduire de 54% en moyenne les quantités d'herbicides. Une réduction de 88% des herbicides a été constatée grâce au pilotage d'un traitement localisé (Arvalis, ITB, and Terres inovia 2021). Des réductions comprises entre 11% et 90%, par rapport à une application conventionnelle ont été observées sur différentes cultures comme les céréales d'hiver, le maïs, la betterave et le coton. Néanmoins, de fortes variations selon les cultures et les années ont été constatées (Balafoutis et al. 2017). Une augmentation de 148% de l'efficacité de l'utilisation des herbicides a eu lieu dans des cultures de coton grâce à une réduction de l'usage de pesticides et une augmentation du rendement (Stamatiadis 2013).

Ces pulvérisateurs permettent de réduire jusqu'à 13,4% les quantités d'insecticides sur les cultures de blé (Soto et al. 2019).

Effets sur le rendement

Peu d'informations existent quant à l'effet de l'ajustement des traitements de pesticides sur le rendement. De façon générale, les rendements sont maintenus voir augmentés si la modulation des doses de pesticides permet une action plus ciblée contre les bio-agresseurs (Soto et al. 2019).

Une augmentation de 10% des rendements a été obtenue pour la culture de coton où la gestion des pesticides était complétée d'une fertigation de précision (Stamatiadis 2013).

Effets sur le temps de travail

L'ajustement des quantités de pesticides à épandre peut assurer un gain de temps lors de la préparation des doses à pulvériser et du traitement, si la pression des bio-agresseurs est moindre. Mais les formations nécessaires pour maîtriser cette technique et la calibration du système sont chronophages et compensent ce gain de temps, induisant au final une augmentation du temps de travail (Soto et al. 2019).

Cette augmentation du temps de travail est du même ordre de grandeur que celle perçue lors de la Fertilisation à taux variable détaillée page 83, soit de 2,8%. En effet, les technologies de pulvérisation de précision sont identiques pour les pesticides et pour les engrais liquides (Balafoutis et al. 2017).

Effet sur le coût de production

D'après la revue de Balafoutis et al. (2017), les gains économiques permis par les pulvérisateurs de précision sont proportionnels à :

- La pression et la répartition en tâche des adventices ;
- La quantité de pesticides appliquée, ce facteur est lié à la compétition des adventices ainsi qu'aux capacités de tolérance et de résistance des cultures ;
- Le coût des pesticides ;
- Le nombre d'applications annuelles ;
- Le type de système utilisé : le risque d'erreurs augmente pour un système sans guidage assisté.

En grandes cultures, les économies d'herbicides détaillées dans la partie réduction des pesticides, page 81, réduisent les coûts de production. Des économies variant de 7 à 79€/ha ont été obtenues, comme le montre le Tableau 35. A cela s'additionnent les coûts de main-d'œuvre et de carburant relatifs à ces technologies. Ils sont du même ordre de grandeur que ceux liés à la Fertilisation à taux variable qui sont détaillés Tableau 36, page 84.

Bien que les pulvérisateurs de précision deviennent de plus en plus accessibles, ils présentent encore un investissement plus élevé que les pulvérisateurs conventionnels. Les coûts variables et fixes sont estimés à, en moyenne, 4,5€/ha plus cher pour les pulvérisateurs de précision. D'autres études estiment l'investissement dans des pulvérisateurs de précision rentable si cela permet une économie de pesticides supérieure à 14€/ha (Balafoutis et al. 2017). En Europe, des experts estiment que les investissements réalisés dans des pulvérisateurs de précision utilisant des cartes de préconisation liées à leur GPS peuvent être amortis en 3 ou 4 ans (Soto et al. 2019).

Tableau 35 - Synthèse des économies de pesticides réalisées grâce à la pulvérisation de précision observée dans la revue de Balafoutis et al. (2017)

Culture	Économie de pesticides réalisée (€/ha)
Maïs	7 à 42
Betteraves	20 à 79
Céréales d'hiver	27 à 36

Effets sur l'atténuation du changement climatique

La réduction de l'utilisation des pesticides n'a pas d'impact direct significatif sur la mitigation des GES par rapport aux émissions totales liées à l'agriculture. Les émissions qui leur sont relatives et qui peuvent être réduites ont essentiellement lieu durant de leur fabrication. Appliqués dans des quantités bien plus faibles que les autres intrants (engrais, semences, carburant), leur impact sur l'émission de GES est très faible au niveau des exploitations agricoles (Balafoutis et al. 2017).

Effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Diminuer le recours aux pesticides par la pulvérisation de précision améliore la qualité de l'eau et de l'air. Davantage d'habitats naturels sont préservés et un accroissement de la diversité des organismes vivants est observé (Soto et al. 2019).

ii. Fertilisation à taux variable

Effets sur l'utilisation d'engrais

D'après une enquête menée auprès de 971 agriculteurs européens, l'usage d'engrais azotés peut être réduit de 8% en moyenne lors de l'utilisation de pulvérisateurs ajustant les doses à l'échelle intra-parcellaire. Or, comme le montre la Figure 6, près de la moitié des agriculteurs interrogés n'ont pas noté d'effet sur la consommation d'engrais azotés lors de l'utilisation de cette technologie (Soto et al. 2019).

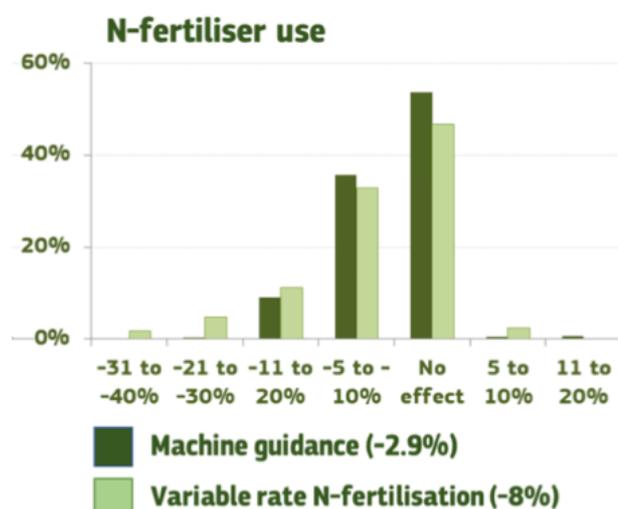


Figure 6 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (Machine guidance) et de la Fertilisation à taux variable (Variable rate N-fertilisation) sur l'utilisation d'engrais azotés. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de Soto et al. (2019)

Une économie de 35% des quantités d'engrais et une augmentation de 106% de l'efficacité de l'usage de l'azote ont été obtenues en fertigation pour des cultures de coton (Stamatiadis 2013). Les autres effets de cette technique sur le rendement et les coûts de production sont détaillés page 84.

Effets sur le rendement

L'ajustement des quantités d'azote permet une augmentation du rendement de 4% en moyenne, d'après l'enquête réalisée auprès d'agriculteurs, comme le montre la Figure 7, (Soto et al. 2019).

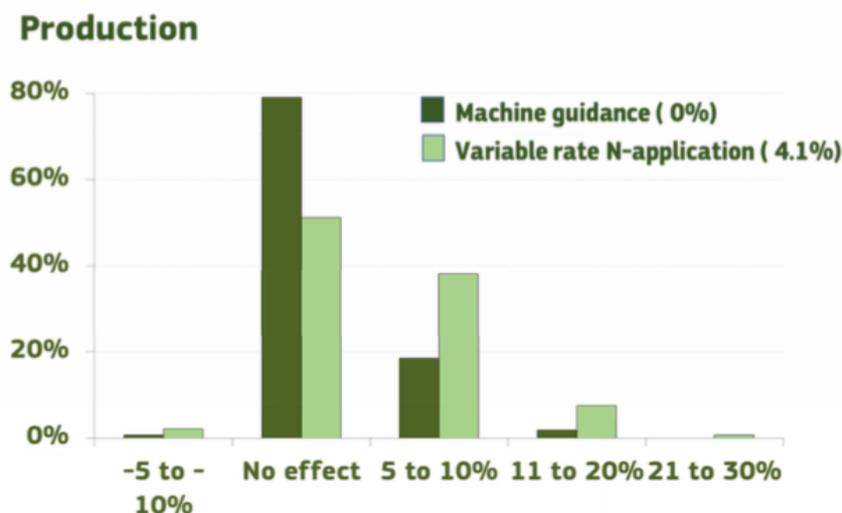


Figure 7 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (machine guidance) et de la Fertilisation à taux variable (Variable rate N-fertilisation) sur le rendement. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de (Soto et al. 2019)

Effets sur le temps de travail

Le temps de travail lié à l'épandage d'engrais est réduit d'en moyenne 1,6% lors de l'utilisation d'épandeurs de précision. Mais les formations nécessaires pour maîtriser cette technique ainsi que le paramétrage du système sont chronophages. Ils augmentent respectivement le temps de travail d'en moyenne 2,2% et 2,3%. Les agriculteurs constatent une augmentation du temps de travail total de 2,8% en moyenne (Soto et al. 2019).

Effet sur le coût de production

Le coût de production augmente de 0,33% en moyenne lors de l'ajustement des quantités d'engrais épandues. Cette augmentation est notamment due à l'augmentation des charges contractuelles liées à la mécanisation, qui est de l'ordre de 4,4% en moyenne d'après l'enquête menée auprès d'agriculteurs. D'autres études quantifient l'augmentation des coûts fixes et variables liés au matériel à environ 4€/ha. La diminution des charges de carburant et de main d'œuvre nécessaire lors de l'épandage, détaillées Tableau 36, contrebalancent cette augmentation. Des économies d'engrais ont également lieu. Elles peuvent aller jusqu'à 42€/ha pour les cultures de maïs, 32€/ha pour le blé d'hiver, 27€/ha pour l'orge et 20€/ha pour le colza (Soto et al. 2019).

Tableau 36 - Impact moyen perçu par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée et de la pulvérisation de précision sur le temps de travail (Soto et al. 2019)

	Effet sur les frais contractuels (%)	Effet sur le coût de la main d'œuvre nécessaire (%)	Effet sur le coût du carburant	Effet total sur le coût de production
Pulvérisation de précision	4,38	- 1,25	- 2,8	0,33

La réduction des intrants ne compense pas toujours l'investissement lié à cette technologie. La Fertilisation à taux variable induit un effet sur la marge brute compris entre -16€/ha et +440€/ha. Entre 40 et 47% des agriculteurs perçoivent un retour sur investissement en moins de 5 ans. Parmi les autres, 25% estiment que le retour sur investissement a lieu sur des périodes supérieures à 11 ans (Soto et al. 2019).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

La réduction des quantités d'engrais induit une diminution des émissions de N₂O directes et indirectes. Couplée à une moindre utilisation de carburant, cela réduit les émissions de CO₂ directes et indirectes. Les émissions d'ammoniac sont également amoindries.

La Fertilisation à taux variable permettrait de réduire les émissions de GES de 5% par rapport aux émissions imputables à l'épandage d'engrais azotés. D'après une étude modélisant leurs effets sur les émissions de GES à l'échelle européenne, ces technologies peuvent réduire entre 3 805 à 6 567 kT eCO₂/an, ce qui correspond à 1,5% des émissions totales de GES du secteur agricole en 2015 (Soto et al. 2019).

Effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

L'application d'engrais ajustée aux besoins des cultures permet également de réduire les risques de lixiviation et d'eutrophisation. Les émissions d'ammoniac sont également amoindries (Soto et al. 2019).

iii. Irrigation à taux variable

L'ajustement des quantités d'eau irriguées, dans les systèmes d'irrigation à débit variable (Variable rate irrigation – VRI), peut être réalisé en contrôlant automatiquement le déclenchement et la durée d'ouverture des buses ou de multiples sections de la rampe à partir d'une carte de préconisation. L'ajustement de la pression de l'eau est une autre alternative (Soto et al. 2019). Ces techniques ont été mises en place sur les systèmes pivots aux États-Unis. Elles peuvent être déclinées sur les rampes d'aspersion et sur les enrouleurs. Elles commencent à voir le jour en Europe.

Peu de données quantifiant les effets de ces techniques sur la consommation d'eau, la productivité et les coûts de production existent aujourd'hui au niveau européen. Ce constat est d'autant plus marqué pour la micro-irrigation de précision seule (Soto et al. 2019).

Réduction de l'eau d'irrigation consommée

Systèmes pivots, rampes d'aspersion et enrouleurs

Une moindre consommation d'eau entraîne une diminution de la consommation d'énergie nécessaire pour le pompage et le transport de l'eau. Une économie d'eau et d'énergie d'environ 30€/ha peut avoir lieu pour les cultures sur-irriguées dans les climats humides (Soto et al. 2019). Des réductions de la consommation d'eau allant de 9 à 19% ont été constatées aux USA, en Nouvelle-Zélande et en Allemagne (Neupane and Guo 2019).

Micro-irrigation

L'évolution des quantités d'eau consommées (augmentation ou une diminution) varie selon les localisations, les années, les conditions pédologiques et climatiques ainsi que selon la pression sanitaire. L'efficacité de la micro-irrigation VRI est donc difficile à quantifier. Néanmoins, on peut estimer qu'avec l'automatisation des coupures de tronçons, l'efficacité de cette technique est égale ou supérieure à ce que permettent les OAD liés à la gestion de l'irrigation, décrits page 77.

Effets sur le rendement

Systèmes pivots, rampes d'aspersion et enrouleurs

Très peu d'informations sont disponibles. A priori, la modulation de l'irrigation cherche à maintenir les rendements ou à tendre vers les objectifs de rendements tout en réduisant la consommation d'eau. Des projets sont actuellement en cours en Europe pour quantifier ces impacts technico-économiques sur des rampes d'irrigation (Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften et al. n.d.). Une étude menée aux US montre une augmentation de 27% de la productivité de l'eau sur des cultures de maïs par rapport à une parcelle irriguée uniformément avec un système d'irrigation pivot (Neupane and Guo 2019).

Micro-irrigation et fertigation

Les recherches menées en fertigation montrent une meilleure assimilation des engrais en présence d'eau, entraînant ainsi une augmentation des rendements. Les résultats obtenus en fertirrigation VRI devraient être de même ordre de grandeur voire supérieurs à ceux obtenus en ajustant manuellement la fertirrigation à partir de prescriptions d'OAD.

Effets sur le temps de travail

De façon générale, l'automatisation de l'irrigation en VRI assure un gain de temps sur le terrain. Mais les formations nécessaires pour maîtriser cette technique et l'adapter au contexte pédologique des sols sur lesquelles elles sont implantées ainsi que la calibration du système sont chronophages (Soto et al. 2019). On peut estimer que ces postes induisent une augmentation du temps de travail de même ordre de grandeur que pour la Fertilisation à taux variable, soit de 2,8%, comme détaillé page 84.

Effet sur le coût de production

Systèmes pivots, rampes d'aspersion et enrouleurs

Si des études ont démontré la viabilité économique des VRI, d'autres soutiennent que cela dépend des cultures, des pratiques culturales réalisées et de l'environnement dans lequel elles sont mises en place. La viabilité économique de ces technologies ne dépend pas tant de l'augmentation de la production qui est générée ou de l'économie d'eau et d'énergie qui est réalisée, mais plutôt du coût d'investissement lié à ces outils. Un bénéfice de plus de 16\$/ha grâce à l'utilisation de la VRI a été observée lors d'une étude américaine par rapport à l'application d'une irrigation uniforme. Aucune étude quantifiant les bénéfices n'a été réalisée en Europe aujourd'hui. La plupart des études existantes quantifient les économies d'intrants (énergie et eau) grâce à des modélisations.

Micro-irrigation et fertigation

Le coût de l'adoption de l'irrigation de précision à partir de systèmes d'irrigation goutte-à-goutte préexistants est estimé à 40€/ha (Soto et al. 2019). A cela s'ajoute le coût des préconisations par les OAD qui est détaillé page 79. L'automatisation du temps de travail réduit les frais liés au pilotage de l'irrigation. Cela contrebalance une potentielle augmentation du temps de travail. La réduction de la consommation d'eau et d'engrais en fertigation induit une baisse du coût de production. Couplée à une augmentation du rendement, la marge brute s'accroît.

Le bénéfice net peut aller jusqu'à 480 €/ha/an en fertigation VRI, même si l'agriculteur doit faire des investissements importants dans de nouveaux équipements. Ces bénéfices nets ont été obtenus en tenant compte des investissements importants réalisés. Ils sont principalement influencés par les quantités d'engrais azotés appliquées et le prix de vente de la culture (Stamatiadis 2013).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les cultures irriguées émettent plus de N₂O que les cultures non irriguées. Cette augmentation se situe entre 50 et 140%. La VRI permettrait de réduire encore plus précisément ces émissions en ajustant les quantités d'eau irriguées aux besoins des cultures par rapport à l'application uniforme des quantités d'eau prescrites par les OAD (Soto et al. 2019).

Effets sur l'eau, le sol, l'air et la biodiversité

La VRI minimise les risques de lixiviation et améliore la qualité des nappes phréatiques. L'oxydation des MO est réduite, favorisant ainsi la qualité du sol. La micro-irrigation réduit la perturbation du sol par rapport aux rampes mobiles (Stamatiadis 2013).

b. Remarques

Bien que ces technologies représentent un investissement, leur coût diminue d'année en année et apparaissent dans de plus en plus d'équipements agricoles. Il est aujourd'hui estimé que 70 à 80% des équipements commercialisés en sont équipés. Ces coûts ainsi que les effets donnés sur l'efficacité des intrants et sur les coûts de production varient d'un pays à l'autre, selon la taille des exploitations, leur type et leurs technologies.

Investissements peuvent être réalisés à l'échelle d'exploitations individuelles ou portées par des entités collectives, comme le fait GAIA® en Grèce notamment dans les régions au sein desquelles les exploitations peuvent être de plus petites tailles.

En parallèle de l'aide à l'investissement, ces outils nécessitent une bonne couverture au débit dans les zones rurales européennes, or elle est inférieure à 50% pour 14 états membres (Ivanova et al. 2018). Pour finir, une meilleure interopérabilité des outils les rendrait plus accessibles aux agriculteurs (Zarco-Tejada, Hubbard, and Loudjani 2014; Kritikos 2017; Kernecker et al. 2019).

Des essais terrains analysant les contextes propices à la rentabilité de nouveaux outils et leurs impacts sur les dimensions socio-économiques des utilisateurs semblent essentiels pour compléter les modélisations et faire reconnaître l'intérêt de ces outils auprès des agriculteurs (Neupane and Guo 2019).

c. Bilan

De par la réduction des quantités de pesticides, des engrais et le maintien voire l'augmentation des rendements, ces outils permettent une gestion efficace des intrants en grandes cultures. L'impact de ces techniques sur la gestion efficace de l'eau est bien plus compliquée à analyser.

Quel que soit les intrants, le gain de temps de traitement est contrebalancé par le calibrage du système et l'appropriation de la technique. Un retour sur investissement et une réduction des coûts de production est possible, en choisissant des outils adaptés à la taille des utilisateurs (exploitation ou ensemble d'exploitations) ou en passant par des organismes tiers.

Alors que la fertilisation à taux variable a la capacité de réduire les émissions de GES, les traitements phytosanitaires à taux variables n'ont aucun effet et l'irrigation de précision influence les émissions de GES selon qu'elle augmente le volume d'eau irriguée, ou inversement.

Ces technologies améliorent la qualité de l'eau, de l'air et du sol et aident à la préservation de la biodiversité. Elles peuvent être utilisées en complément d'autres leviers, comme des mesures de prophylaxie, de gestion des sols ou de gestion mécanique (Aubertot et al. 2005).

3. Robots de désherbage chimique

Près de 90% des robots agricoles sont des robots de traite pour les animaux. Au niveau des cultures, ils ont d'abord été développés pour le maraîchage. Le travail en milieu ouvert avec des variations topographiques et météorologiques, des cultures différentes évoluant au fil de leur croissance rend la conception de robots pour les grandes cultures complexe. En grandes cultures, les robots sont conçus dans un premier temps pour les cultures sarclées à fort écartement comme les betteraves et le maïs. Des tests sont en cours de réalisation pour les cultures de céréales à paille et de colza (Savary and Legrain 2020).

Les différents types de robots se répartissent en trois catégories :

- Les robots de surveillance, de collecte de données sur les parcelles (présence de ravageurs, état de développement...), ou d'assistance logistique pour le transport, ou pour l'épandage et la pulvérisation localisés. Il s'agit de systèmes avec des outils embarqués, sans contacts physiques avec l'environnement de travail (Cabeza-Orcel and Berducat 2016; Sorel 2019) ;
- Les robots outils qui sont en contact avec l'environnement mais sans préhension. Il s'agit de robots d'entretien mécanique (binage, désherbage, éclaircissage, tonte...).
- Les robots qui effectuent des tâches physiques et complexes comme la taille, la récolte, la plantation ou la transplantation. Ces robots qui ne sont pas liés aux intrants étudiés, ils ne sont donc pas considérés dans cette partie (Cabeza-Orcel and Berducat 2016).

La majorité des robots commercialisés en grandes cultures sont des plateformes autoguidées sans conducteurs, de la taille de petits tracteurs. Beaucoup de prototypes de petits robots sont en développement. Il s'agit de robots de la taille d'une tondeuse ou d'un aspirateur, qui fonctionnent en essai et qui sont très adaptés pour les cultures associées (Cabeza-Orcel and Berducat 2016).

L'arrivée des tracteurs autonomes était annoncée pour 2020. Ces tracteurs sans chauffeurs vont se développer à partir de 2020-2025. Le marché de la robotique agricole qui était de 16,3 milliards de dollars en 2020 devrait atteindre 74 milliards de dollars en 2024 et être occupé de moitié par les tracteurs autonomes. Leur développement est très corrélé à l'agrandissement des exploitations agricoles (Savary and Legrain 2020).

D'autres types de robots, désherbant grâce à des lasers font leur apparition en Allemagne. Bien qu'il ne soit pas encore adapté pour les grandes cultures, ce type de désherbage semble prometteur (Savary and Legrain 2020).

L'objectif des robots est à la fois de réduire le temps de travail et de ne plus avoir de résidus de fertilisation ou de pesticides détectables. Peu d'informations sur les robots liés à la fertilisation sont disponibles. On dénombre une quinzaine de robots grandes cultures commercialisés en Europe, qui sont essentiellement des robots désherbeurs chimiques ou mécaniques (Sorel 2019; Julien 2018). Les robots d'entretien mécanique sont détaillés page 97. Ainsi, seuls les robots désherbeurs chimiques, qui réalisent des traitements ultra-localisés sur le rang et l'inter-rang, grâce à une détection des adventices au cm, tels que Ecorobotix®, sont considérés dans cette partie (Julien 2018).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation d'herbicides

Selon leur technologie, les robots de désherbage chimique permettent de réduire jusqu'à 20 fois les quantités de matière active par rapport à un passage d'herbicide total (Julien 2018; Farm Europe 2020). Certains constructeurs affirment qu'ils assurent des réductions pouvant aller jusqu'à 90% du volume des traitements (Sorel 2019).

Leur efficacité sur les adventices varie entre 30% et 80% (Julien 2018), selon leur capacité à les détecter. Certains robots arrivent à en détecter une trentaine environ (Sorel 2019). D'autres sont des machines apprenantes, car la banque d'images qui permet à l'algorithme de reconnaître les adventices a la capacité de s'étoffer (Julien 2018).

Deux passages d'herbicides suivi de quatre passages de robot désherbeur chimique permettent de réduire la consommation d'herbicide de 51% par rapport à un traitement herbicide en plein selon (Julien 2018). Cela revient à maintenir le même niveau de contrôle des adventices soit une note de 8/10. Lors de cette expérimentation, un passage d'herbicide suivi de quatre passages de robot obtient une note de 7/10 (Julien 2018).

Effets sur le rendement

Les rendements ne sont pas affectés si plus de 80% des adventices sont maîtrisées.

Effets sur le temps de travail

Les petits robots de désherbage ont des débits de chantier de 0,08 à 0,3 ha/h selon le salissement de la parcelle et le fonctionnement du robot (énergie photovoltaïque...), ce qui est bien plus lent qu'un tracteur avec une bineuses (13 ha/h en moyenne). Or ils ont vocation à travailler de façon collaborative, par dizaine d'unités et peuvent travailler 10 à 12h/jour. (Sorel 2019; Julien 2018; Cabeza-Orcel and Berducat 2016). Ils permettent ainsi de réduire la pénibilité du travail (J.V. 2021).

Effets sur le coût de production

Ces petits robots coûtent aujourd'hui entre 23 000 et 27 000 euros. Ce coût est conséquent s'il faut investir dans plusieurs robots pour créer un essaim et atteindre une productivité équivalente à celle d'une gestion des adventices conventionnelle. Ce coût est néanmoins à mettre face au gain de temps, à la possibilité de continuer à désherber et à l'économie de pesticide réalisée grâce à ces technologies (Julien 2018).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

La réduction du recours aux herbicides et une moindre consommation de carburant constatée par rapport à l'utilisation d'outils tractés ou de pulvérisateurs réduit les émissions de CO₂ indirectes (Farm Europe 2019; Balafoutis et al. 2017). Il est néanmoins très difficile de quantifier ces réductions (Lowenberg-DeBoer et al. 2020). Elles sont à nuancer avec les émissions liées à la construction des robots qui est, elle aussi, difficile à quantifier.

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Les structures légères des robots limitent les risques de compaction et abiment moins la structure du sol par rapport aux tracteurs actuels (Julien 2018; Cabeza-Orcel and Berducat 2016). Une pulvérisation ajustée et localisée d'herbicide joue également en faveur de la qualité de l'eau et du sol.

b. Remarques

Des problèmes de détection peuvent avoir lieu lorsque les adventices sont à leur stade précoce ou lorsque que les feuilles de la culture couvrent les adventices du rang. Les jeux d'ombres et de lumière peuvent également impacter la détection des adventices (Julien 2018).

Les robots évoluent dans un univers contrôlé pour lequel les agriculteurs les ont formaté. Les agriculteurs doivent les formater pour les adapter aux conditions du terrain. La formation des agriculteurs pour maîtriser ces outils et les adapter aux conditions du terrain est la clé à leur démocratisation (Savary and Legrain 2020).

De nombreuses questions relatives à la responsabilité des actes d'un robots restent en suspens, d'autant plus pour les robots agricoles qui travaillent dans des environnements ouverts et changeants (Cabeza-Orcel and Berducat 2016).

c. Bilan

Les robots de désherbage chimique font leur apparition en grandes cultures et ciblent aujourd'hui les cultures sarclées à fort écartement et le colza. Leur capacité à détecter de façon ultra-précise les adventices permet de réduire les quantités d'herbicides pulvérisées. Plusieurs passages de robots couplés à un ou deux passages d'herbicide assurent une gestion des adventices satisfaisante qui n'impacte pas le rendement. Ce constat reste malgré tout à nuancer en fonction de multiples facteurs comme la pression des adventices, de leur type, leur stade de croissance, les conditions météorologiques et topographiques ou encore du mode de fonctionnement du robot. Ils réduisent la pénibilité du travail, mais le débit de chantier d'un robot est inférieur à celui d'un tracteur ou d'un pulvérisateur à cause de sa petite taille. Ce débit de chantier augmente s'ils travaillent en essaim, tel qu'est leur objectif. Or leur coût deviendrait bien plus conséquent. Si leur effet sur la réduction du risque de compaction est reconnu, leur potentiel effet dans la lutte contre le changement climatique est à difficile à quantifier. Leur développement commence tout juste et semble prometteur, à condition que les agriculteurs soient formés pour les adapter à leurs parcelles. Des questions relatives à la responsabilité des actes d'un robot restent toujours en suspens.

C. Les stabilisateurs de nitrification

Les stabilisateurs de nitrification sont des molécules qui limitent les pics d'azote nitrique dans le sol ainsi que les émissions de N_2O et de NH_3 . Ces stabilisateurs peuvent être divisés en deux groupes :

- Les inhibiteurs d'uréase qui empêchent la transformation de l'urée en NH_4^+ (ammonium) et qui ralentissent les émissions de NH_3 ;
- Les inhibiteurs de nitrification qui retardent le processus de nitrification.

Un engrais contenant ces molécules est dit "stabilisé".

Les engrais stabilisés sont à ne pas confondre avec les engrais à libération lente ou contrôlée. Ces derniers retardent ou contrôlent leur assimilation et usage par la plante; ce qui assure une assimilation sur une durée beaucoup plus étalée. La durée de l'assimilation varie selon les mécanismes mis en place (enrobage, lente hydrolyse de certains composés...) (Trenkel 2010).

Cette partie concerne uniquement les stabilisateurs de nitrification en grande culture.

1. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation d'engrais

Ces molécules assurent le maintien de l'azote assimilable par les plantes dans le sol. Appliquées aux doses prescrites, les inhibiteurs de nitrification permettent de maintenir les quantités d'azote assimilées par les cultures en réduisant de 10% la fertilisation azotée (Gimat et al. 2019). Selon une méta-analyse, l'efficacité de l'utilisation d'engrais azotés augmente de 13% en moyenne selon les facteurs climatiques et la gestion des cultures (Abalos et al. 2014).

Effet sur le rendement

Dans la plupart des études, les inhibiteurs n'affectent pas les rendements. D'autres études observent néanmoins une augmentation des rendements comprise entre 0.8 et 10.2% selon les espèces étudiées (Byrne et al. 2020).

Effet sur le temps de travail

Aucun surplus de travail n'est associé à cette pratique (Gimat et al. 2019).

Effet sur le coût de production

Cette pratique entraîne un surcoût compris entre 3.2 et 4.2% par rapport au coût initial de la fertilisation (Carswell et al. 2019). Il est estimé à 0.34€/ha/kg d'N épandu soit à environ 60€/ha/an (Gimat et al. 2019).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Des réductions d'émissions de N₂O d'en moyenne 60% ont été mesurées. Cet ordre de grandeur varie selon les types de sol, comme le montre le Tableau 37. Les associations de plusieurs inhibiteurs de nitrification accroissent les réductions de N₂O qui peuvent aller jusqu'à 90% (Byrne et al. 2020).

Tableau 37 - Réduction des émissions de N₂O suite à l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification selon différents types de sol (Byrne et al. 2020)

Type de sol	Réduction d'émission de N ₂ O maximum mesurée
Limoneux	93%
Agrile alcaline	43%
Sableux	40%

Des études estiment que les stabilisateurs de nitrification peuvent réduire de 317 kg eq CO₂/ha/an les émissions de GES (Gimat et al. 2019).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Des réductions de 47 à 89% des pertes de NH₃-N (azote ammoniacal) par lixiviation ont été observées lors d'utilisation d'inhibiteurs d'uréase, améliorant ainsi la qualité des sols, de l'eau et de l'air (Gimat et al. 2019). Néanmoins, des doutes subsistent quant à leur écotoxicité et à la persistance de certains composés (Gimat et al. 2019). Il semble nécessaire d'approfondir les études sur ce sujet (Byrne et al. 2020).

2. Remarques

La comptabilisation des réductions d'émissions reste néanmoins difficile à estimer due aux incertitudes liées à la réduction des émissions de N₂O et à l'efficacité des stabilisateurs de nitrification (Gimat et al. 2019). Leur efficacité qui est d'ailleurs très variable selon leur mode de fonctionnement : les inhibiteurs d'uréase ont des durées de vie de 3 à 7 jours alors que les inhibiteurs de nitrification ont des durées de vie comprises entre 4 et 8 semaines, selon les conditions environnementales (Trenkel 2010).

3. Bilan

Malgré l'intérêt qu'ont ces molécules sur l'efficacité de l'azote épandue, la meilleure disponibilité de l'azote et la possible réduction de lixiviation, elles ne sont pas économiquement rentables pour les agriculteurs (Gimat et al. 2019).

D. Autres alternatives

D'autres types d'agroéquipement sans pilote embarqué se démocratisent. Il s'agit, par exemple, des Unmanned Aerial Vehicle. Flying Aerial material (UAVFA) ou des drones. Ils permettent de prendre des vues aériennes qui alimentent ensuite les outils de pilotage décrits page 76. Ils peuvent réaliser la pulvérisation de traitements phytosanitaires tout protégeant la santé de l'opérateur. D'autres assurent le lâcher de produits de biocontrôles dans les parcelles (Soto et al. 2019; Sorel 2019).

III. Substitution des intrants

A. Pesticides

1. Lutte physique

La lutte physique cible les adventices. Elle est perçue comme une alternative aux herbicides. Se distinguent, parmi les différents moyens existant, le désherbage mécanique, le désherbage mécanique robotisé et le désherbage thermique. Ce dernier, dont les principales méthodes sont le désherbage à flamme, à vapeur ou à l'eau chaude n'a pas été considéré dans cette étude. En effet, leur recours est néfaste pour la biodiversité des premiers centimètres du sol, coûteux, émetteur de GES. Il peut être source de départs d'incendies (Guyomard et al. 2013).

a. Désherbage mécanique

La herse étrille et la houe rotative permettent de travailler l'ensemble de la surface du sol de façon superficielle. Seuls les premiers centimètres du sol sont fragmentés, ne touchant que les adventices peu développées. Ces outils sont utilisés dans les cultures d'orge et de blé de printemps et d'hiver, de colza, de pois, de féverole, de tournesol et de maïs (Arvalis 2014; Agrotransfert, n.d.). La bineuse s'utilise plutôt sur des cultures semées avec un large écartement comme le maïs, la betterave, le tournesol, le colza ou la féverole. Elle peut passer sur des adventices plus développées, plusieurs fois par cycle (Arvalis 2014).

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation d'herbicides

Le recours à la herse étrille et à la houe rotative présente des résultats mitigés sur des cultures de blé, le colza, orge et triticale. Il faut souvent multiplier leur passage et les associer à des traitements herbicides pour obtenir une efficacité sur les adventices supérieure à 80%, considérée comme satisfaisante (Garnica et al. 2020; Vuillemin and Duroueix 2020). La lutte mécanique ne montre pas de réelle efficacité sur les adventices pour les cultures de betterave. L'utilisation de la herse étrille ou du binage seul a une efficacité inférieure à la limite d'acceptabilité. L'association avec un traitement herbicide permet d'atteindre 80% d'efficacité (Vuillemin and Duroueix 2020). En culture de maïs, l'efficacité du binage associé à un ou deux traitements herbicides localisés sur le rang est supérieure à 90% sur le rang. Elle est de l'ordre de 70% sur l'inter-rang, ce qui est à la limite de l'acceptabilité de salissement (Garnica et al. 2020). Il est parfois possible de se passer d'un traitement, de choisir des molécules moins nocives ou de réduire la dose pulvérisée (Garnica et al. 2020; Arvalis 2014).

Le désherbinage consiste à désherber simultanément le rang de façon chimique et l'inter-rang de façon mécanique. Cette technique peut être utilisée en culture de maïs, colza, tournesol et soja. Cet outil permet de réduire de 2/3 les zones traitées et assure une économie de 60 à 70% d'herbicide (Vuillemin and Duroueix 2020; Hansen et al. 2019). Cette technique permet de réduire la dérive de 75%,. Si des buses anti-dérives sont utilisées, la dérive peut être réduite jusqu'à 90%.

Effets sur le rendement

Si l'efficacité de la lutte mécanique (associée ou non à des herbicides) est satisfaisante, aucun impact sur la quantité et la qualité du rendement n'a lieu, quelles que soient les cultures. Les baisses maximales constatées lors d'expérimentations sont de l'ordre d'une tonne par hectare pour le blé, de 10% pour la betterave, de 16% pour le maïs (Garnica et al. 2020).

Effets sur le temps de travail

La houe rotative, la herse étrille et la bineuse nécessitent une préparation du sol en amont pour le niveler. La herse étrille et la houe rotative ont des débits de chantier élevés qui sont respectivement de 6 à 8 ha/h et de 4 à 8 ha/h. La bineuse a un débit de chantier plus faible allant de 2 à 4 ha/h. Ce débit peut augmenter s'il y a un autoguidage (Agro-transfert, n.d.). Ces opérations doivent être répétées 2 à 3 fois pour accroître leur efficacité (Garnica et al. 2020).

Un désherbinage permet de réduire de moitié le temps consacré au désherbage en effectuant deux passages en un (Hansen et al. 2019).

Effets sur le coût de production

La lutte mécanique contre les adventices entraîne une consommation accrue de carburant et une augmentation de la main d'œuvre. Cela coûte, avec le coût de la traction 10 €/ha pour la herse étrille et la houe rotative et 18 €/ha pour la bineuse (Agro-transfert, n.d.). Le coût d'une bineuse en betterave varie entre 23,88 €/ha et 105 €/ha selon l'équipement et la précision du système (autoguidage par coutre ou par caméra) (Dubois and Pottiez 2013). Il est conseillé d'augmenter la densité de semi de 15-20% en prévention d'éventuels dégâts réalisés par les outils, ce qui augmente le coût de production (Vuillemin and Duroueix 2020). Un traitement évité ou réduit représente 30 à 100 €/ha d'économie (Garnica et al. 2020).

Un désherbinage coûte environ 18 €/ha et n'est pas à additionner au coût d'une pulvérisation. Les charges liées aux pesticides sont réduites à 9 à 40 €/ha (Hansen et al. 2019).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Le désherbage mécanique n'induit pas une augmentation des émissions de N₂O. Un passage de houe rotative suivi d'un sol nu en hiver peut induire une lixiviation de 25kg N/ha en moyenne (Hansen et al. 2019). Des émissions directes de CO₂ peuvent également augmenter par la consommation de carburant, si un désherbage chimique en complément reste nécessaire.

Le désherbinage permet une réduction de 60-70% des émissions indirectes de CO₂ par rapport à une pulvérisation standard d'herbicides. Il réduit également de moitié la consommation de carburant, soit les quantités d'émissions directes de CO₂.

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

La lutte mécanique améliore la structure des sols limoneux qui sont sensibles à la battance. La houe rotative et la bineuse assurent un écroutage et une aération du sol. Une augmentation du risque d'érosion, de perte de matière organique et de phosphore vers les eaux peut néanmoins avoir lieu. Ces techniques préviennent la sélection d'adventices résistantes aux principaux herbicides (Guyomard et al. 2013; Agro-transfert, n.d.).

ii. Remarques

Un désherbage mécanique est fortement dépendant de la pluviométrie. Il doit être réalisé dans des conditions climatiques favorables, sur des plages de temps qui peuvent être très limitées (Guyomard et al. 2013; Agro-transfert, n.d.). La couverture d'adventices, leur stade de développement et l'état du sol impactent le type d'outil nécessaire et la date d'intervention. Un sol tassé, caillouteux ou motteux ne convient ni à la houe rotative ni à la herse étrille (Arvalis 2014). Les courbes et dénivelés sont source de dégâts sur la culture lors d'un passage de bineuse (Guyomard et al. 2013).

Les outils de désherbage et de désherbinage demandent un investissement qui peut être réalisé au niveau d'un groupement d'agriculteurs, d'une coopérative ou d'une CUMA. Un tel partage peut s'avérer compliqué si les périodes où les conditions climatiques permettant un désherbage mécanique sont limitées. Investir dans de tels outils demande à ce que les conditions pédologiques et climatiques favorables soient réunies (Guyomard et al. 2013). Il existe aussi certaines contraintes techniques comme la compatibilité de l'écartement des rangs entre le semoir et la bineuse (Vuillemin and Duroueix 2020). Ces contraintes demandent d'anticiper le recours au désherbage mécanique lors de la définition de l'itinéraire technique.

Le passage de ces outils est à raisonner. Le passage de la herse étrille sur une parcelle propre peut augmenter la germination des adventices. Le désherbage mécanique est peu efficace contre les plantes vivaces qui sont multipliées et disséminées par les outils qui les fragmentent (Garnica et al. 2020).

L'efficacité des traitements associant contrôle mécanique et chimique dépend grandement de l'efficacité des herbicides utilisés et du stade de la culture auquel ils sont appliqués (Garnica et al. 2020).

iii. Bilan

Le désherbage mécanique nécessite des outils spécifiques selon les stades de développement en grande culture. Cette solution est efficace si elle est répétée régulièrement ou associée avec des traitements herbicides qui peuvent être appliqués en doses réduites ou localement. Elle peut éviter un traitement en grande culture.

La rentabilité peut être réduite par une plus grande consommation de carburant et de temps et par un potentiel impact sur la qualité et la quantité du rendement. Le bilan GES de cette solution est moins bon que celui du désherbage chimique dû aux émissions directes de CO₂ liées au carburant.

b. Désherbage mécanique robotisé

Le désherbage mécanique robotisé figure parmi les types d'agriculture de précision. Il s'agit d'outils comme des bineuses, herses, outils rotatifs ou à interceptes qui intègrent des technologies de conduite assistée et de reconnaissance des adventices pour être autonomes. Les premiers robots bineurs ont été vendus en 2016 en Europe. Ils sont surtout développés pour les cultures à forte valeur ajoutée avec un inter-rang large, comme en horticulture, en maraîchage ou en viticulture. Leur marché se développe doucement. A titre d'exemple, une trentaine de robots Dino de Naïo Technologie® ont été commercialisés en 2019 pour biner des cultures en planches (Savary and Legrain 2020). Quelques projets existent en grande culture, notamment en betterave.

Les robots de désherbage mécanique se distinguent de robots pulvérisant de façon ultra-précise des herbicides, qui sont détaillés page 89. Certains agriculteurs combinent des robots de désherbage mécanique et chimique pour réaliser un désherbinage.

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation d'herbicides

L'autonomie des outils rend la multiplication des interventions possible. La fréquence et la régularité des passages des robots accroissent le contrôle de la flore adventice (Gaviglio 2018).

Les robots de désherbage mécanique ont une efficacité sur les adventices mesurée à plus de 80% sur les betteraves (Lowenberg-DeBoer et al. 2020; Fountas et al. 2020). En moyenne, les quantités d'herbicide sont réduites de 20 fois par rapport à un désherbage chimique (Farm Europe 2019). Cette quantité peut varier de 30 à 75% pour les cultures de betteraves et de céréales (Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

Effets sur le rendement

Aucune information concernant l'effet des robots sur les rendements n'est donnée hormis par les constructeurs, selon qui l'impact est nul (Naïo Technologies 2016). Si l'efficacité des robots de désherbage est satisfaisante, soit supérieure à 80%, aucun impact sur la quantité et la qualité du rendement n'a lieu, quelles que soient les cultures.

Effets sur le temps de travail

Bien que l'utilisation de robots requiert une présence humaine, ils réduisent le temps de travail de 20% environ (Barbière 2020).

Effets sur le coût de production

Une synthèse des études réalisées entre 1990 et 2018 avance le manque de recherche concernant l'impact économique de la robotisation en agriculture (Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

En culture de céréale, l'hypothèse d'un désherbage mécanique réalisé en 5 passages avec un essaim de robots coûterait 30 €/ha/an par robot. Ce type de robot coûte environ 600 € l'unité (Lowenberg-DeBoer et al. 2020). L'investissement d'un robot de désherbage mécanique en betterave permet de réduire de 600 € le coût du désherbage, par rapport à un désherbage manuel (100 h/ha) (Lowenberg-DeBoer et al. 2020). Les robots associant désherbage mécanique et chimique permettent, pour une exploitation betteravière de 80 hectares, de réduire les coûts de production de 12% à 24% sur 10 ans en tenant compte des intérêts et dépréciations (Balafoutis et al. 2017).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

D'après Lowenberg-DeBoer et al. (2020), des hypothèses sur les bénéfices environnementaux ont été émises sans être quantifiées. La réduction du recours aux herbicides entraîne une réduction des émissions indirectes de CO₂ liées à leur fabrication. Cette affirmation est à nuancer, car la construction de robots est elle aussi émettrice. Une réduction du carburant est constatée par rapport à l'utilisation d'outils tractés ou de pulvérisateurs, diminuant ainsi les émissions de CO₂ directes (Lowenberg-DeBoer et al. 2020; Farm Europe 2019; Balafoutis et al. 2017).

Autres effets sur le sol, l'eau l'air et la biodiversité

Les robots qui ont une taille inférieure à un tracteur réduisent les risques de compaction du sol par rapport à un tracteur tractant un outil ou un pulvérisateur (Lowenberg-DeBoer et al. 2020). Ils ont la capacité de travailler en présence et au plus proche d'éléments naturels comme les arbres, rochers, cours d'eau (Lowenberg-DeBoer et al. 2020). Une moindre utilisation d'herbicides bonifie la qualité de l'eau et de l'air.

ii. Remarques

Face au coût d'investissement d'un robot, des solutions comme les prestations et contrats de désherbage réduisent les coûts d'utilisation et rentabilisent les robots sur de plus grandes surfaces (Lowenberg-DeBoer et al. 2020). Une dernière alternative serait d'aider à l'investissement des robots, car leur utilisation est un levier pour réduire le recours aux herbicides et joue en faveur de l'environnement. Or, la capacité des robots de désherbage à atteindre les objectifs environnementaux par rapport à d'autres solutions alternatives n'est pas unanime (Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

Les robots de désherbage ont des effets plus ou moins marqués selon la localisation. D'avantages de bénéfiques économiques ont été trouvés dans la moitié nord de l'Europe (Royaume unis et Danemark) que dans la partie sud (Grèce) (Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

iii. Bilan

Les robots de désherbage commencent à se développer en grande culture. Peu de données quantitatives sur leurs performances sont disponibles aujourd'hui. Ils permettent de réduire voire de se passer d'herbicides. Les rendements ne sont généralement pas affectés. La pénibilité de travail est réduite, permettant de réorganiser ses priorités. Ils réduisent potentiellement les émissions de CO₂ et améliorent la qualité de l'air, de l'eau et du sol. Malgré tous ces avantages, les robots de désherbage manquent de compétitivité par rapport à d'autres méthodes à cause de leur coût. Bien moins développés qu'en viticulture, des alternatives facilitant leur accessibilité devraient les aider à se démocratiser.

2. Biocontrôle

Le biocontrôle est l'ensemble des méthodes de protection des végétaux basées sur l'utilisation de mécanismes préventifs ou curatifs naturels. Il s'agit d'une régulation des organismes vivants induite de façon directe ou indirecte par l'utilisation de microorganismes et de macroorganismes prédateurs, parasitoïdes, pathogènes ou concurrents du bio-agresseur. Des substances d'origine microbienne, végétale, minérale et animale, qui sont naturelles ou synthétisées de façon identique à la nature peuvent être également utilisées. Certains médiateurs chimiques comme les phéromones en font également partie. Les microorganismes, substances d'origine naturelle, et médiateurs chimiques sont considérés comme des produits phytopharmaceutiques et sont soumis à une autorisation de mise en marché.

Au sein du biocontrôle, la lutte biologique qui se base sur l'utilisation des organismes vivants se distingue de la lutte biotechnique qui utilise des phénomènes biologiques ou des produits d'origine organique mais pas d'êtres vivants. La lutte biotechnique peut inclure des produits qui ne remplissent pas systématiquement les critères pour être inscrits en tant que biocontrôle (Dumoulin et al. 2019).

a. Lutte biologique

La lutte biologique peut être réalisée par l'introduction et l'acclimatation d'une nouvelle espèce, par lâchers massifs ou en inoculant de petites quantités d'organismes prédateurs des bio-agresseurs ciblés. La manipulation de l'environnement pour favoriser les ennemis du bio-agresseur fait également partie des moyens mis en place en lutte biologique. Cela peut se faire, par exemple, par l'insertion des éléments agro-écologiques (Aubertot et al. 2005). Ces derniers ont été détaillés page 41.

La lutte biologique est très développée en arboriculture, maraîchage, horticulture et viticulture, mais ils concernent bien moins les grandes cultures.

i. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation de pesticides

La sclérotinose est, avec la fusariose et l'oïdium une des principales maladies pour lesquelles des solutions de biocontrôle sont développées en grande culture (Dumoulin et al. 2019). Différentes luttes faisant appel à des bactéries (*Bacillus pumilus*), des oomycètes (*Pythium oligandrum*), des mycoparasites (*Coniothyrium minitans*), ou des minéraux (soufre) sont des alternatives aux fongicides. Les principaux ravageurs contre lesquels sont développées des solutions de biocontrôle sont la pyrale du maïs, les doryphores et les taupins dans les cultures de pommes de terre et de maïs. Les agents de biocontrôle utilisés sont des insectes comme les larves de Trichogrammes ou le Spinosad, une substance obtenue par la fermentation de *Saccharopolyspora spinosa*, une bactérie présente dans le sol.

Les résultats obtenus ne sont pas toujours concluants et peuvent être controversés, que ce soit entre des essais réalisés pour un même couple produit de biocontrôle/bio-agresseur, ou entre différents produits. La variabilité des résultats est influencée par la culture, les ravageurs, le degré de contamination, le type d'agents biologiques qui existent et le climat. Certains vont avoir une efficacité inférieure aux pesticides conventionnels. D'autres auront une efficacité proche voire supérieure aux molécules de synthèse. Le Spinosad par exemple est réputé pour offrir une alternative aussi efficace que les néonicotinoïdes contre les doryphores de la pomme de terre. Leur efficacité varie dans le temps selon les produits. Elle peut parfois s'accroître progressivement ou être effective durant 18 mois (Dumoulin et al. 2019).

Les agents de biocontrôle contre les adventices sont peu développés aujourd'hui. Des solutions basées sur le principe d'allélopathie, de prédation des graines par des auxiliaires comme des carabidés ou des rhizobactéries commencent à être étudiées. Des recherches sur la formulation de bioherbicides ou mycoherbicides sont en cours. Il s'agit d'une alternative aux herbicides de synthèse complexe à mettre en place (Bailey 2014; Le Bars et al. 2019).

Effet sur le rendement

Les agents de biocontrôle n'ont pas d'effet direct sur le rendement. Ils permettent d'assurer un rendement si le taux d'infestation des bio-agresseurs est inférieur au seuil maximal assurant l'efficacité de la lutte biologique. Le rendement obtenu avec l'utilisation de tels produits est généralement supérieur au témoin sans contrôle. Or, comme le montre le Tableau 38, il n'est pas toujours supérieur ou égal au rendement obtenu lors d'un traitement phytosanitaire.

Tableau 38 - Effets des produits de biocontrôle sur le rendement (Dumoulin et al. 2019)

Culture	Bio-agresseur	Organisme de biocontrôle	Comparaison à	Effet sur le rendement
Colza	Sclérotinia	Spore de <i>Coniothyrium minitans</i>	Témoin non traité	+ 6-10 q/ha
Colza	Sclérotinia	Spore de <i>Coniothyrium minitans</i>	Traitement avec fongicides	Différence non significative
Maïs	Pyrale	Trichogrammes	Témoin non traité	100€/ha
Colza	Sclérotinia	<i>Pythium oligandrum</i>	Témoin non traité	+ 3 T
Colza	Sclérotinia	<i>Pythium oligandrum</i>	Traitement avec fongicides	- 1 T

Effets sur le temps de travail

La plupart des agents de biocontrôle ont une posologie très similaire aux produits phytopharmaceutiques conventionnels lorsqu'ils doivent être pulvérisés. D'autres modes de disposition, comme des sachets de larves existent. Le positionnement de certains doit être ajusté en fonction des points de contamination, ce qui augmente la durée de mise en place (Dumoulin et al. 2019).

Effets sur le coût de production

La gamme de prix des produits de biocontrôle s'étend de 15 à 60 € par hectare en grande culture (Dumoulin et al. 2019). Les coûts peuvent varier du simple au double pour un couple agent biologique/bio-agresseurs, selon la formulation des différents produits. Un produit est dit aussi rentable qu'un traitement phytosanitaire conventionnel jusqu'à environ 40€/ha et sont plus chers au-delà. La fréquence des traitements peut également augmenter, élevant ainsi le coût de production. Ces produits ne requièrent pas de grosse mécanisation. Ceux en sachet peuvent être dispersés manuellement, ce qui engendre un coup supplémentaire lié à la main d'œuvre et à l'équipement, si c'est réalisé à l'aide de drones (Dumoulin et al. 2019; Aubertot et al. 2005).

Le recours à une demi-dose de fongicide remet en question l'intérêt économique de cette solution qui est déjà coûteuse et à qui on additionne le coût d'un traitement supplémentaire (Dumoulin et al. 2019).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Quel que soit le type de production végétale, l'introduction d'agents biologiques pour lutter contre les adventices, maladies et ravageurs n'affecte pas l'état du sol. Elle n'a donc pas d'effet sur les émissions de N₂O et sur la séquestration de carbone. Ces pratiques sont généralement peu coûteuses en énergie directe et indirecte, limitant ainsi les émissions de CO₂ (Guyomard et al. 2013).

Certains agents de biocontrôle, comme des bactéries ou des champignons peut produire du NH₃ (Khan, Bano, and Babar 2020).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Le moindre recours aux pesticides, permis par les produits de biocontrôle améliore la qualité de l'air, de l'eau et joue en faveur de la biodiversité. Certains agents biologiques agissent comme SDP (stimulateurs de défenses des plantes). C'est le cas de l'oomycète *Pythium oligandrum* sur le blé et le colza. D'autres produits, comme le soufre peuvent servir d'engrais (Dumoulin et al. 2019).

ii. Remarques

La plupart des produits de biocontrôle se revendiquent sans conséquence néfaste pour l'environnement. Cette affirmation est à nuancer, car l'origine naturelle des produits de biocontrôle ne leur retire pas leur toxicité. Cela accélère néanmoins leur reconnaissance et dégradation par les processus biochimiques de l'écosystème, lorsqu'ils ne sont pas inhérents ou rémanents. L'utilisation de certains agents biologiques comme le Spinosad est débattue à cause de leur toxicité envers les pollinisateurs et leur persistance. D'autre part, l'introduction de prédateurs ou de parasites doit être fait en connaissant le milieu, au risque de voir certaines espèces devenir invasives. Le cas des coccinelles asiatiques en est un bon exemple (Dumoulin et al. 2019).

Les produits de biocontrôle qui ont pour principe actif des organismes vivants voient leur efficacité varier selon les conditions climatiques (Guyomard et al. 2013; Dumoulin et al. 2019). Afin de garantir un contrôle efficace des bio-agresseurs, il est parfois conseillé de les associer avec une demi-dose de pesticides (Rotolo et al. 2018). Cette association n'est pas toujours possible car certains agents biologiques comme l'oomycète *Pythium oligandrum* sont sensibles aux pesticides. Le recours à de faibles doses de pesticide peut entraîner la création de phénomènes de résistance et impacter les différentes composantes de l'environnement (eau air et biodiversité) ainsi que la santé de l'utilisateur (Aubertot et al. 2005; Dumoulin et al. 2019).

Leur développement est confronté à des difficultés techniques lors de la formulation des produits, en partie à cause de la multiplication à grande échelle des agents biologiques et du spectre étroit de bio-agresseurs ciblés. A cela s'ajoute la difficile estimation de leurs effets curatifs et/ou préventifs. Leur survie implique des conditions de logistique et de stockage lourdes, tant au niveau de la distribution qu'au niveau des exploitations (Aubertot et al. 2005; Bailey 2014).

iii. Bilan

Les produits de biocontrôle sont moins développés en grande culture que dans d'autres productions et concernent essentiellement les maladies et les ravageurs. Leur efficacité n'est pas toujours égale à celle des pesticides conventionnels et dépend de nombreux facteurs, notamment climatiques. Les performances de production sont incertaines. Associées au coût non négligeable des produits de biocontrôle, ces alternatives peuvent compromettre la performance économique des exploitations.

Les produits de biocontrôle peuvent réduire les émissions de CO₂ liées à la consommation d'intrants de synthèse. Une amélioration de la qualité de l'eau, de l'air et de la biodiversité a lieu si le recours aux pesticides est réduit. Mais leur impact sur l'environnement est à nuancer car l'introduction d'organismes dans l'écosystème peut potentiellement induire des déséquilibres non recherchés liés à la toxicité ou la prédation des agents de biocontrôle utilisés. Un travail de R&D peut permettre à la fois de développer des produits plus efficaces et d'identifier les potentiels effets négatifs.

b. Lutte biotechnique

La lutte biotechnique correspond à l'utilisation de médiateurs chimiques. Le recours à des phéromones pour réaliser de la confusion sexuelle en est l'exemple de plus connu. D'autres médiateurs chimiques comme les stimulateurs de défenses naturelles ont la capacité d'induire chez les plantes des mécanismes de résistance aux bio-agresseurs.

i. Confusion sexuelle

L'utilisation de phéromones ne concerne que certains insectes et est spécifique au bio-agresseur ciblé. La confusion sexuelle désoriente les mâles et les femelles suite à une saturation de phéromones dans l'environnement (Guyomard et al. 2013). Largement développée en viticulture et en arboriculture, elle l'est beaucoup moins en grande culture. De récentes études sur l'usage de la confusion sexuelle contre les taupins dans les cultures de maïs montrent des résultats mitigés (Larroude and Thibord 2018).

ii. Stimulateurs de défenses naturelles

Stimulateurs de défenses naturelles (SDN) ou stimulateurs de défenses des plantes (SDP) correspondent à toute substance ou micro-organisme vivant non pathogène qui, une fois en contact avec la plante va lui induire un état de vigilance ou de défense par rapport aux bio-agresseurs (Aubertot et al. 2005). Il s'agit de traitements préventifs activant les mécanismes de défense des plantes par rapport aux bio-agresseurs causant des maladies fongiques (Faessel et al. 2014).

1) Résultats obtenus

Réduction des intrants

Leur efficacité varie de 0 à 100%. De nombreuses références scientifiques pointent un manque de corrélation entre les résultats prometteurs issus d'expérimentations contrôlées et ceux aléatoires obtenus en plein champs (Faessel et al. 2014; Maumene et al. 2018).

Leur efficacité est partielle et limitée dans le temps. Elle dépend de l'interaction avec la variété, du stade de développement de la plante, de l'environnement (température, luminosité, nutriments disponibles) et de la formulation des produits. C'est pourquoi plusieurs applications sont généralement recommandées, en association avec un traitement phytosanitaire (Aubertot et al. 2005). Certaines recherches ont montré une meilleure efficacité lorsque les SDP sont associés avec des traitements fongiques en demi-dose, plutôt qu'en alternant des traitements fongiques et SDP en pleine dose (Maumene et al. 2018).

Effets sur le rendement

Quelle que soit la culture, son rendement et sa qualité sont, à cause de la variabilité d'action des SDN, inférieurs ou égaux aux rendements obtenus en ayant recours aux pesticides (Faessel et al. 2014; Guyomard et al. 2013; RIVIÈRE-WEKSTIEN 2015).

Effets sur le temps de travail

Les SDP sont généralement appliqués par pulvérisation, comme les traitements fongiques (Dusserre et al. 2018). Les traitements doivent être répétés tous les 7 à 14 jours (Petit, Aveline, and Molot 2020; Maumene et al. 2018). La charge de travail est d'autant plus importante s'ils sont couplés à des traitements fongicides.

Effets sur le coût de production

Les SDP ont un coût comparable à très supérieur aux fongicides en grande culture (Hirschy, Leveau, and Halska 2018). Une augmentation du coût de production peut avoir lieu s'ils sont associés à des pesticides ou si l'occurrence des traitements est importante (Guyomard et al. 2013).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les SDN ne consomment pas plus d'énergie que les pesticides. Les émissions de GES sont égales s'ils sont appliqués seuls (Hirschy, Leveau, and Halska 2018). Elles augmentent s'ils sont associés à des traitements fongiques (Guyomard et al. 2013).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

L'effet des SDP sur la qualité de l'eau, de l'air et sur la biodiversité dépend de l'éco-toxicologie de la molécule utilisée (Hirschy, Leveau, and Halska 2018).

2) Remarques

Le coût énergétique lié à l'activation des défenses de la plante peut amoindrir les performances de rendement (Dusserre et al. 2018). De plus, l'association des SDP avec un fongicide en demi-dose peut augmenter les risques de résistance.

3) Bilan

Les SDP présentent un ensemble de contraintes économiques (rendement potentiellement inférieur, charges de travail supplémentaires et coût de production égal ou supérieur), pour une efficacité variable et un intérêt environnemental mitigé.

c. Efficacité du biocontrôle

Pour être le plus efficace possible, la lutte biologique et biotechnique doivent s'inscrire dans une démarche prophylactique à plus grande échelle en s'associant à l'allongement des rotations, au recours à des variétés résistantes, en broyant les résidus de culture, en assurant une meilleure couverture des sols... (Guyomard et al. 2013).

B. Engrais

1. Engrais organique

Les quantités d'engrais de synthèse appliqués ont diminué de 12% au cours des 20 dernières années mais les émissions qui leur sont liées ont augmenté de 5% entre 2005 et 2018 (Debarge and Tenaud 2015; "AMMONIAC (FORMAT SECTEN)" n.d.). Cela s'explique par la composition des engrais utilisés. Les engrais à base d'urée ont vu leur utilisation augmenter sur cette période. Or ils sont plus émetteurs que d'autres formes d'engrais comme les ammonitrates, ce qui élève donc les émissions totales liées aux engrais. Leur consommation a ralenti en 2017, ce qui a entraîné une légère baisse des émissions en 2018 ("AMMONIAC (FORMAT SECTEN)" n.d.).

Les émissions liées à l'apport d'engrais et d'amendements organiques comme le compostage de déchets verts de collectivités, l'utilisation de fumier et d'effluents d'élevage ou de digestats de méthanisation varient selon les pays. Elles ont stagné entre 2005 et 2018 en France mais ont augmenté en Belgique, Luxembourg, Pays-Bas et Italie ("AMMONIAC (FORMAT SECTEN)" n.d.).

La fertilisation est globalement surestimée. Ce surplus est estimé en France à, en moyenne 30 kg d'azote par hectare, ce qui correspond à 28% de la fertilisation réalisée. Il a également été constaté que les parcelles fertilisées avec des engrais minéraux et organiques présentent en moyenne un surplus d'azote supérieur à celui de parcelles fertilisées uniquement avec des engrais minéraux (Debarge and Tenaud 2015).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation d'engrais

Une amélioration de la prise en compte des apports d'azote organiques dans le calcul de la dose à apporter augmenterait leur recours pour remplacer l'azote minéral de synthèse. Cela réduirait les besoins en engrais azotés minéraux de 15 kg N/ha en moyenne. Ce chiffre masque cependant une grande hétérogénéité qui dépend du type de culture et des modalités d'utilisation des produits organiques (Debarge and Tenaud 2015).

Effets sur le rendement

Un manque de caractérisation des engrais organiques peut impacter négativement le rendement. Néanmoins, il existe de nombreux outils comme les OAD pour ajuster et compléter ces apports en tenant compte des apports, de la dynamique de fertilisation, des fractions organiques, des modalités d'apports, *etc.* Il est donc considéré que les choix du type d'engrais – organique ou de synthèse, n'impacte pas le rendement (Debarge and Tenaud 2015).

Effets sur le temps de travail

La gestion des engrais organiques demande plus de technicité que celle des engrais minéraux, à cause de la variabilité de la richesse de ces apports qui dépend de leur forme et de leur origine. Une légère augmentation du temps de travail peut être constatée, à cause d'un plus lent débit de chantier et d'une augmentation du temps d'observation, d'après (Guyomard et al. 2013). Mais selon Debarge and Tenaud (2015), l'impact sur le temps de travail est faible.

Effets sur le coût de production

La fertilisation correspond à environ 20-30% du coût variable de production (Denhartigh, Dumas, and Lebahers 2018). Bien que l'épandage d'engrais organiques entraîne une consommation de carburant égale ou supérieure, leur coût est considéré comme inférieur à celui des engrais de synthèse (Guyomard et al. 2013). Selon (Debarge and Tenaud 2015), une fertilisation raisonnée qui se base sur une plus grande consommation d'engrais organique assure une économie de 20 à 40€/ha/an sur l'achat d'engrais.

Effets sur l'atténuation du changement climatique

La fertilisation azotée est l'un des plus lourds postes de consommation énergétique d'une exploitation agricole. 25 à 30% du prix des engrais de synthèse correspond à leur coût énergétique. La fabrication des engrais minéraux correspond à 95% des émissions qui leur sont liées. La fabrication d'une tonne d'ammoniac émet en moyenne 2 tonnes eCO₂ et une tonne d'acide nitrique émet en moyenne 2 kg de N₂O, soit 0,6 tonnes eCO₂. Cela représentait près de 40% des dépenses d'une exploitation en grandes cultures en 2009. L'utilisation d'engrais organique permettrait d'économiser environ 20% de la consommation d'énergie indirecte par rapport aux engrais de synthèse. Couplée à un gestion raisonnée de la fertilisation, cela permettrait de réduire les émissions liées à la fabrication et au transport des engrais à 280 kg éq CO₂/ha/an. Une économie de 35 kg N minéral/ha équivaut à environ 525 kWh/ha, soit 236 kg CO₂/ha (Denhartigh, Dumas, and Lebahers 2018; Debarge and Tenaud 2015).

Les émissions de N₂O augmentent fortement après les apports azotés. Ils sont principalement émis par l'activité microbienne et dépendent fortement des pratiques agronomiques et des caractéristiques pédoclimatiques. L'effet et la localisation des formes d'engrais minéraux sur les émissions de N₂O des sols sont encore peu référencés (Debarge and Tenaud 2015).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

Les principaux engrais minéraux utilisés en Europe (urée, ammoniate calcique et engrais Azote-Phosphore-Potassium (NPK) ont un effet acidifiant sur le sol. Les apports d'effluents d'élevage n'ont pas d'effet acidifiant direct. Ils sont bénéfiques pour la diversité et l'abondance de micro-organismes et de la faune du sol. Ils maintiennent efficacement le niveau des MO. Ils peuvent néanmoins être une source de pollution du sol et de l'eau par les ETM (Éléments Traces Métalliques), le zinc, le cuivre, les médicaments (antibiotiques et antiparasitaires) qu'ils contiennent. L'ampleur et la fréquence de ces phénomènes reste heureusement relativement faible (Guyomard et al. 2013; Debarge and Tenaud 2015).

La forme de l'engrais conditionne les émissions de NH₃ ou de ses précurseurs. Ce qui influence la qualité de l'air. Ces pertes d'azote vers l'air contribuent par des dépôts atmosphériques à augmenter les risques d'acidification d'autres sols plus sensibles, notamment les sols forestiers (Debarge and Tenaud 2015). Parmi les différentes formes d'engrais minéral, l'urée est la plus sensible à la volatilisation. Les engrais organiques peuvent également émettre des émissions de NH₃, selon leur composition, surtout s'il s'agit d'effluents d'élevage liquide (Guyomard et al. 2013).

La substitution des engrais de synthèse par les engrais organiques associés au pilotage de la fertilisation permet une baisse des émissions de NH₃ de 1 à 6 kg/ha selon les formes d'azote en jeu (Debarge and Tenaud 2015).

Une autre alternative est le recours aux additifs et aux stabilisateurs de dénitrification qui sont détaillés page 92. Les émissions ammoniacales sont influencées par bien d'autres facteurs comme le pH du sol, le pH du produit, les pratiques culturales et la période d'épandage (Tailleur et al. 2020).

b. Remarques

Au-delà du type d'engrais, la technique d'épandage influence les émissions de GES liés aux engrais ainsi que leur impact environnemental. L'enfouissement même superficiel des engrais, permet de réduire drastiquement les émissions de NH_3 (Tailleur et al. 2020).

Les variations d'émissions de NH_3 observées entre deux années consécutives peuvent s'expliquer en partie par les fluctuations des livraisons d'engrais. Il a été constaté que les livraisons d'engrais annuelles augmentent lorsque les prix des produits agricoles sont élevés car les agriculteurs cherchent à maximiser leurs rendements. Elles sont à l'inverse beaucoup plus faibles lorsque les prix des produits agricoles sont bas, car les agriculteurs cherchent à limiter leurs dépenses ("AMMONIAC (FORMAT SECTEN)" n.d.).

De nombreux outils existent pour accompagner le changement de pratiques de fertilisation et pour gagner en précision. Cette pratique est complémentaire aux outils de pilotage, aux systèmes de direction assistée et d'application localisée, ainsi qu'aux choix variétaux (Debarge and Tenaud 2015).

Les systèmes de polyculture-élevage ont des consommations d'engrais qui sont en moyenne 74% inférieures à celles réalisées en conventionnelle. Le revenu global par actif est plus élevé dans les systèmes herbagers (Denhartigh, Dumas, and Lebahers 2018).

c. Bilan

L'utilisation d'engrais organique permet de réduire la consommation d'engrais minéraux. Cela induit des économies au niveau du coût de production et diminue les émissions de CO_2 indirectes liées à la fabrication des engrais de synthèse. Le choix d'une fertilisation organique ou de synthèse n'impacte pas les émissions de N_2O . La composition des engrais et des amendements, qu'ils soient organiques ou de synthèse, influence les émissions de NH_3 et donc l'acidification de certaines zones. Il est possible de réduire ces émissions en enfouissant les engrais après leur épandage. La caractérisation des engrais organiques est primordiale pour bénéficier de leur effets positifs sur la teneur en MO des sols sans les polluer. Couplée à des outils de gestion de la fertilisation, elle assure que les rendements ne soient pas impactés par la composition des engrais organiques qui peut être plus variable. Leur recours peut néanmoins induire une faible augmentation du temps de travail. Cette pratique est complémentaire aux outils de pilotage, aux systèmes de direction assistée et d'application localisée, ainsi qu'aux choix variétaux. Ensemble, ils garantissent une gestion raisonnée de la fertilisation qui réduit la consommation d'engrais, les émissions de GES et de NH_3 et qui assure des économies aux agriculteurs (Debarge and Tenaud 2015).

2. Engrais verts

Les engrais verts sont des cultures contenant des légumineuses semées dans le but de fournir de l'azote à la culture suivante (Thromas, Bompard, and Giuliano 2018). Elles assimilent l'azote atmosphérique par leur capacité de fixation biologique de l'azote (FBA) si leur culture est supérieure à 60 jours. Elles sont ainsi autonomes en azote et réduisent l'usage d'engrais azotés durant leur culture (Véricel et al. 2018; Thromas, Bompard, and Giuliano 2018). Lors de la dégradation de leurs résidus, une partie de l'azote qu'elles contiennent est minéralisée par les microorganismes du sol et rendue disponible à la culture suivante.

Ce sont des plantes pérennes ou annuelles généralement implantées en mélange avec d'autres légumineuses, brassicacées ou céréales plutôt que seules. Elles sont mises en place durant quelques mois à quelques années (Baddeley et al. 2017). En grandes cultures, elles sont le plus souvent implantées durant l'interculture, après la récolte de la culture précédente ou en association avec cette dernière. Elles sont dégradées voire enfouies par les mêmes moyens que les cultures intermédiaires, détaillés page 18 (Thromas, Bompard, and Giuliano 2018).

a. Résultats obtenus

Effets sur l'utilisation d'engrais minéral

L'assimilation de cet azote permet une économie d'engrais azoté pouvant aller de 23 kg d'N/ha à 70 kg d'N/ha dans la culture suivante sans perte de rendement en Europe (Stagnari et al. 2017; Véricel et al. 2018). Ces réductions se traduisent en une économie de 18 à 24€/ha.

Les quantités d'azote disponibles pour la culture suivante dépendent de la capacité de FBA des différentes espèces de légumineuses, du climat et de la disponibilité en eau. L'assimilation de l'azote libéré par les légumineuses est d'autant plus importante si les quantités d'azote fournies concordent avec les besoins azotés de la culture suivante et qu'une faible fertilisation azotée est réalisée. Ces facteurs complexifient l'isolation et la quantification de l'azote mis à disposition par les légumineuses pour la culture suivante par rapport aux autres sources (Stagnari et al. 2017).

Effets sur le rendement

L'augmentation du rendement d'une culture de céréales suivant une culture de légumineuses est comprise entre 0,1 T/ha et 1,6 T/ha par rapport à une monoculture de céréales. Cette augmentation est plus importante que celle obtenue en diversifiant la rotation avec des espèces non fixatrices d'azote, comme le montre le Tableau 39. Elle permet un gain de 20 à 300€ par hectare par rapport à une monoculture de céréales. Cela peut rétablir un rendement moyen satisfaisant à l'échelle de la rotation, voire même augmenter la marge brute jusqu'à plus de 10€/ha/an (Preissel et al. 2017). En Pologne, une augmentation de 25% des rendements a été obtenue en moyenne suite à l'introduction de légumineuses dans les rotations en labour conventionnel, en TCS ou en non labour, par rapport à ces systèmes en monoculture de céréale (Wozniak et al. 2019).

Tableau 39 - Effet d'une culture diversifiée sur la culture de céréale suivante par rapport à deux cultures de céréales consécutives, d'après (Preissel et al. 2017)

Culture précédente	Culture étudiée	Effet de la culture précédente sur le rendement de céréale obtenu	Spécificité
Légumineuses	Céréales et tournesol	0,2 à 1,6 T/ha	Avec fertilisation modérée ou élevée
Brassicacées (colza)	Céréales	0,1 à 0,4 T/ha	Avec fertilisation modérée mais sans fertilisation élevée

Néanmoins, si la période de libération de l'azote ne concorde pas avec celle d'assimilation de la culture suivante ou que les conditions climatiques et hydriques ne sont pas favorables, la productivité des rotations peut chuter de 6 à 9% par rapport à des rotations témoins avec ou sans légumineuses (Lechenet et al. 2014; Véricel et al. 2018).

Effets sur le temps de travail

En grande culture, l'effet de l'insertion de légumineuses sur le temps de travail varie selon leur introduction dans la rotation. Selon les sources, il peut n'y avoir aucune incidence sur la charge de travail. D'autres relèvent une augmentation jusqu'à 2,2h/ha/an. Des estimations plus précises sont données dans les parties diversification de la rotation, page 10, associations de cultures, page 16, et insertion de cultures intermédiaires, page 23.

Effets sur le coût de production

L'intérêt économique des engrais verts se calcule en additionnant les économies d'intrants réalisées sur les engrais verts et sur la culture suivante ainsi que le gain lié à l'augmentation du rendement de la culture suivante. Des économies de pesticides pouvant aller jusqu'à 50€/ha, d'engrais d'en moyenne 18 à 24€/ha et de 20 à 60€/ha de carburant sont constatées. Toutefois, pour des quantités d'azote égales, le coût de l'azote mis à disposition pour la culture suivante par les engrais verts est supérieur au coût de l'azote fourni par les engrais de synthèse (Baddeley et al. 2017). L'augmentation des revenus liée aux gains de rendement impact beaucoup plus les performances économiques que ces réductions d'intrants (Preissel et al. 2017).

Effets sur l'atténuation du changement climatique

L'ajustement des quantités d'engrais sur la culture suivant les engrais verts permettrait d'éviter l'émission d'1 kg N₂O/ha issus de la production et de l'épandage d'engrais (Véricel et al. 2018). Les conditions pédoclimatiques jouent sur l'émission de N₂O lors d'enfouissement des engrais verts (Stagnari et al. 2017).

Le rôle des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de culture a été clairement démontré (Lechenet et al. 2014). La réduction d'apports azotés que permettent les légumineuses sur la culture suivante se traduit en une réduction des émissions de CO₂ indirectes de 277 kg eCO₂/ha/an en moyenne (Stagnari et al. 2017).

La culture de légumineuses augmente la teneur en COS et en humus des sols cultivés. D'après une étude réalisée en Pologne durant trois ans sur sol sableux, la teneur en COS augmente de 7,21 g/kg de MO pour des cultures de légumineuses par rapport à des cultures d'avoine (Stagnari et al. 2017).

Autres effets sur le sol, l'eau, l'air et la biodiversité

L'insertion d'autres espèces cultivées au sein de la rotation accroît la biodiversité cultivée. La succession de différents types de racine améliore la structure du sol et sa perméabilité à l'air et à l'eau. Les risques de compaction et d'érosion sont réduits. Les phénomènes de lixiviation sont amoindris si l'azote fourni par l'engrais vert concorde avec les besoins de la culture suivante (Verdier et al. 2019; Preissel et al. 2017). L'activité biologique est stimulée et la quantité de MO augmente (Thromas, Bompard, and Giuliano 2018).

b. Remarques

La gestion des engrais verts peut être délicate pour en tirer les bénéfices sans causer de stress hydrique et azoté ou d'augmenter les risques de lixiviation. L'augmentation de la volatilisation d'ammoniac suite à la mise en place d'engrais verts est une conséquence plus spécifique aux climats méditerranéens (Baddeley et al. 2017). Un accompagnement peut s'avérer nécessaire.

c. Bilan

Les engrais verts permettent de réduire une partie de l'azote épandue sur la culture suivante en grande culture. Cette compensation a lieu à condition que l'azote fourni par les engrais verts soit disponible au moment où la culture suivante en a besoin. Si cela concorde, une augmentation des rendements de la culture suivante est constatée en grande culture. La création de stress hydrique par les engrais vert peut être source d'une baisse de rendement pour la culture suivante.

Le coût des intrants est réduit, mais le temps de travail augmente. Les engrais verts réduisent les émissions de N₂O, de CO₂ et améliorent le taux de COS. La biodiversité, la structure des sols et la qualité de l'eau sont améliorées.

Discussion

Il ressort de cet état des lieux qu'il y a une diversité de leviers à utiliser et non une solution unique à promouvoir dans toute l'Union Européenne. A l'échelle de l'Europe, certaines pratiques peuvent avoir à la fois des effets bénéfiques et négatifs. De nombreux facteurs influencent le choix des pratiques et leurs effets sur l'utilisation des intrants, sur le climat, l'environnement et les conditions socio-économiques. Il s'agit, entre autres :

- du contexte de l'exploitation et de la parcelle ;
- des conditions pédoclimatiques ;
- de la topographie ;
- des pratiques déjà en œuvre ;
- de l'historique des pratiques réalisées ;
- des quantités d'intrants appliquées qui sont très variables d'une culture à l'autre ;
- du matériel à disposition ;
- des réglages ;
- de la maîtrise des pratiques ;
- de la taille de l'exploitation ;
- de la proximité de zones urbaines...

L'étude réalisée permet néanmoins de dégager les pratiques qui ont démontré leur intérêt, dans des conditions données et qui permettraient de tendre vers les objectifs de neutralité d'émissions GES et d'usage économe des intrants, bases des stratégies F2F et biodiversité.

Parmi les pratiques liées à la stratégie de reconception des agrosystèmes, **la diversification des rotations et la couverture maximale du sol, notamment lors de la période d'interculture**, ressortent comme une des solutions pouvant être les plus bénéfiques.

Il en est de même pour **un travail du sol alternant labour et travail du sol plus superficiel**.

La sélection de variétés résistantes, précoces ou tardives présente également de nombreux avantages. Les modalités de mise en œuvre de ces types de pratiques sont larges et permettent de choisir les cultures, les variétés, leur insertion dans les rotations *etc.* les plus adaptées au contexte de l'exploitation.

Parallèlement, il existe de nombreux moyens d'améliorer l'efficacité d'utilisation des pesticides, des engrais et de l'irrigation grâce à une **modernisation des agroéquipements, aux préconisations d'OAD et à une application locale et ajustée des intrants**. La majorité des nouveaux équipements commercialisés comprennent aujourd'hui certaines technologies d'agriculture de précision. Certes, plus les agroéquipements ajustent les intrants ou limitent les pertes plus ils sont coûteux. Il existe néanmoins des **alternatives abordables comme les OAD ou le remplacement de certaines pièces**.

Les pratiques qui cherchent à substituer les intrants ne permettent généralement pas de se passer complètement de pesticides. Certaines solutions, comme le biocontrôle, sont peu

développées en grandes cultures par rapport à d'autres productions et peuvent s'avérer coûteuses et chronophages. Ces pratiques restent des alternatives préventives et complémentaires. Elles peuvent être intéressantes à mettre en œuvre dans des exploitations ou des parcelles de petite taille.

La substitution des engrais de synthèse par des engrais verts ou organiques permet de réduire les émissions de GES liées à leur fabrication. Les engrais verts demandent de la technicité pour fournir une partie de l'azote nécessaire aux cultures. Les engrais organiques peuvent remplacer totalement les engrais de synthèse, mais leur accès n'est pas toujours évident pour les exploitations en grandes cultures.

Il existe beaucoup d'informations sur les différentes pratiques qui peuvent parfois apparaître contradictoires. C'est en sélectionnant les informations correspondant à un contexte local qu'il est possible de déterminer les pratiques qui y sont bénéfiques. Certaines pratiques, comme la diversification des rotations, les cultures intermédiaires, les engrais verts, le broyage des résidus, le biocontrôle, l'utilisation d'OAD *etc.*, ou encore les faux semis et les TCS sont interdépendantes et complémentaires. Tenir compte de cette complémentarité en travaillant sur des ensembles de pratiques facilite la répartition des charges de travail durant l'année.

A court terme, **un accompagnement local voire régional des agriculteurs** paraît utile pour les aider à identifier ces ensembles de pratiques. **Des formations sont nécessaires** pour leur permettent de prendre en main rapidement et d'utiliser au maximum le potentiel de leurs agroéquipements. **Les préconisations des OAD doivent également être ajustées aux conditions locales.**

Au-delà de l'appui à l'accompagnement des agriculteurs, **il est primordial d'assurer l'accessibilité des agroéquipements, des AOD et de soutenir la modernisation du parc matériel pour améliorer l'efficacité d'utilisation des intrants.** C'est une priorité que devraient se donner les politiques publiques.

La robotique, quant à elle, est aujourd'hui trop récente et trop chère. D'ici 15 ou 20 ans, elle pourrait être une solution supplémentaire prometteuse.

Bibliographie

- Abalos, Diego, Simon Jeffery, Alberto Sanz-Cobena, Guillermo Guardia, and Antonio Vallejo. 2014. “@Meta-Analysis of the Effect of Urease and Nitrification Inhibitors on Crop Productivity and Nitrogen Use Efficiency.” *Agriculture, Ecosystems & Environment* 189 (May): 136–44. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>.
- Abdalla, Mohamed, Astley Hastings, Kun Cheng, Qian Yue, Dave Chadwick, Mikk Espenberg, Jaak Truu, Robert M. Rees, and Pete Smith. 2019. “A Critical Review of the Impacts of Cover Crops on Nitrogen Leaching, Net Greenhouse Gas Balance and Crop Productivity.” *Global Change Biology* 25 (8): 2530–43. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>.
- Agro-transfert. n.d. *Les Conditions de Réussite Du Désherbage Mécanique*.
- Albrecht, Matthias, Matthias Tschumi, and Brett R Blaauw. 2020. “Global Synthesis of the Effectiveness of Flower Strips and Hedgerows on Pest Control, Pollination Services and Crop Yield The Health of Maine’s Bumble Bee Community View Project,” no. July. <https://doi.org/10.22541/au.158618502.29242370>.
- Altieri, Miguel A., Marcos A. Lana, Henrique V. Bittencourt, André S. Kieling, Jucinei J. Comin, and Paulo E. Lovato. 2011. “Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil.” *Journal of Sustainable Agriculture* 35 (8): 1–15. <https://doi.org/10.1080/10440046.2011.588998>.
- “AMMONIAC (FORMAT SECTEN).” n.d. CIPETA. Accessed October 10, 2021. <https://www.citepa.org/fr/2020-nh3/>.
- Arvalis. 2014. *Matériels de Désherbage Mécanique*. file:///Volumes/GoogleDrive/Mon Drive/Efficiency des intrants/Pesticides/Pesticides biblio/Gestion mécanique/Matériels de désherbage mécanique - ARVALIS-infos.fr - YouTube.webarchive.
- Arvalis, ITB, and Terres inovia. 2021. “L’agriculture de Précision Au Service de La Transition Agroécologique En Grandes Cultures.”
- Aspar, Juliette. 2019. “Pratiques et Systèmes Agricoles Résilients En Condition de Sécheresse.”
- Aubertot, Jean-Noël, Jean-Marc Barbier, Alain Carpentier, Jean-Noël Gril, Laurence Guichard, Philippe Lucas, Serge Savary, Marc Voltz, and Isabelle Savini. 2005. “Pesticides, Agriculture et Environnement.”
- AUDIGEOS, Delphine, Edouard BARANGER, Christophe BERGEZ, Valérie BONNEAU, Ludovic BONIN, Michel BONNEFOY, Delphine BOUTTET, et al. 2018. “Céréales à Paille Variétés et Interventions d’automne - Le Blé Tendre -.” *Choisir & Décider - Synthèse Nationale*, 2018.
- Baddeley, John A., Valentini A. Pappa, Aurelio Pristeri, Göran Bergkvist, Michele Monti, Moritz

- Reckling, Nicole Schläfke, and Christine A. Watson. 2017. "Legume-Based Green Manure Crops." In *Legumes in Cropping Systems*, 125–38. <https://doi.org/10.1079/9781780644981.0125>.
- Bailey, Karen L. 2014. "Chapter 13 - The Bioherbicide Approach to Weed Control Using Plant Pathogens." *Integrated Pest Management*, 245–66.
- Balafoutis, A, B Beck, S Fountas, J Vangeyte, and T van der Wal. 2017. "Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics." *Sustainability* 9 (1339): 28.
- Barbière, Cécile. 2020. "La Robotique Prend Le Relais Sur Le Désherbage." Euractiv. 2020.
- Bars, Jordan Le, Paola Salazar, Lola Leveau, Julien Halska, and Matthieu Hirschy. 2019. "UTILISER LA CONFUSION SEXUELLE EN VERGER ET EN VIGNE." GECO. 2019. https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252ecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fUtiliser_La_Confusion_Sexuelle.
- Bedoussac, L., E.-P. Journet, P. Rouet, C. Josse, S. Ledoux, and E. Justes. 2011. "Cultiver Du Blé (Dur Ou Tendre) En Association Avec Une Legumineuse à Graine - Un Moyen Efficace Pour Accroître La Production et La Qualité Des Graines En Agriculture Biologique." In *Journée Technique : Conception et Évaluation Des Systèmes de Grande Culture En AB Restitution Du Programme CITODAB (PSDR Midi-Pyrénées)*, 16. Toulouse.
- Bedoussac, Laurent. 2009. "Analyse Du Fonctionnement Des Performances Des Associations Blé Dur-Pois d'hiver et Blé Dur-Féverole d'hiver Pour La Conception d'itinéraires Techniques Adaptés à Différents Objectifs de Production En Systèmes Bas-Intrants." *Université de Toulouse*.
- Bedoussac, Laurent, Etienne Pascal Journet, Henrik Hauggaard-Nielsen, Christophe Naudin, Guenaëlle Corre-Hellou, Erik Steen Jensen, Loïc Prieur, and Eric Justes. 2015. "Ecological Principles Underlying the Increase of Productivity Achieved by Cereal-Grain Legume Intercrops in Organic Farming. A Review." *Agronomy for Sustainable Development* 35 (3): 911–35. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>.
- Beillouin, Damien, Aidan Schneider, Benoît Carrouée, Francis Flenet, Jean-pierre Cohan, and Marie-hélène Jeuffroy. 2017. "Risques de Pertes de Nitrate Par Lixiviation à Court et Moyen Terme Dans Les Rotations Céréalières Incluant Du Pois Ou Du Colza." *Innovations Agronomiques* 60 (November): 59–76.
- Benoit MOUREAUX. 2014. "COMMENT ENVISAGER L'ALLONGEMENT DES ROTATIONS ?" Perspectives Agricoles. 2014. <https://www.arvalis-infos.fr/comment-envisager-l-allongement-des-rotations--@/view-17297-arvarticle.html>.

- Blaszczyk, Nicolas. 2020. "Les Solutions Alternatives Au Désherbage Conventionnel de La Pomme de Terre." 2020.
- Borg, J., L. P. Kiær, C. Lecarpentier, I. Goldringer, A. Gauffreteau, S. Saint-Jean, S. Barot, and J. Enjalbert. 2018. "Unfolding the Potential of Wheat Cultivar Mixtures: A Meta-Analysis Perspective and Identification of Knowledge Gaps." *Field Crops Research* 221 (September 2017): 298–313. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006>.
- BOURGEOIS, Maëva, Elise COQUILLART, Morgane CURNARIE, Claire FASSINO, Matthieu ARCHAMBEAUD, and Stéphane De TOURDONNET. 2013. "Azote." Supagro. 2013. https://www.supagro.fr/ress-pepites/ingenierieprobleme/co/1_1_Azote.html#.
- Broué, Thomas. 2016. "N'edu : Gestion de l'azote En Agriculture." Educagri Éditions. 2016. <https://editions.educagri.fr/num/NEDU/N1-gestion-azote/co/3-AA1.html>.
- Byrne, Maria P., John T. Tobin, Patrick J. Forrestal, Martin Danaher, Chikere G. Nkwonta, Karl Richards, Enda Cummins, Sean A. Hogan, and Tom F. O'Callaghan. 2020. "Urease and Nitrification Inhibitors—As Mitigation Tools for Greenhouse Gas Emissions in Sustainable Dairy Systems: A Review." *Sustainability* 12 (15): 6018. <https://doi.org/10.3390/su12156018>.
- Cabeza-Orcel, Paloma, and Michel Berducat. 2016. "Robots En Grandes Cultures, Les Défis d'aujourd'hui et Promesses Pour Demain." *Perspectives Agricoles*, 2016. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/e0/a3/1e/89/438_2176868582683475849.pdf.
- Cadoux, Stéphane, Gilles Sauzet, Thibaut Pruvot, and Francis Flénet. 2019. "Implementation, Diversification of Cropping Systems in a Context of Shallow Soils: Systems, and Performances of Both on-Station and on-Farm." In *DiverIMPACTS European Conference on Crop Diversification*, 35–36.
- Calcante, Aldo, and Roberto Oberti. 2019. "A Technical-Economic Comparison between Conventional Tillage and Conservative Techniques in Paddy-Rice Production Practice in Northern Italy." *Agronomy* 9 (12). <https://doi.org/10.3390/agronomy9120886>.
- Caroline Gibert. 2020. "QuESSA - Quantification of Ecosystem Services for Sustainable Agriculture."
- Carpentier, Mathilde. 2014. "Francis Bourges : « Efficience Améliorée, Temps Gagné et Image Redorée »." Terre-Net Média. 2014. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique-culturale/article/francis-bourges-efficience-amelioree-temps-gagne-et-image-redoree-217-104037.html>.
- Carrer, Dominique, Gaétan Pique, Morgan Ferlicoq, Xavier Ceamanos, and Eric Ceschia. 2018. "What Is the Potential of Cropland Albedo Management in the Fight against Global

Warming? A Case Study Based on the Use of Cover Crops.” *Environmental Research Letters* 13 (4): 1–11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab650>.

Carswell, Alison, Rory Shaw, John Hunt, Antonio Rafael Sánchez-Rodríguez, Karen Saunders, Joseph Cotton, Paul W. Hill, Dave R. Chadwick, Davey L. Jones, and Tom H. Misselbrook. 2019. “Assessing the Benefits and Wider Costs of Different N Fertilisers for Grassland Agriculture.” *Archives of Agronomy and Soil Science* 65 (5): 625–39. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1519251>.

Cerdà, Artemi, Óscar González-Pelayo, Antonio Giménez-Morera, Antonio Jordán, Paulo Pereira, Agata Novara, Eric C. Brevik, et al. 2016. “Use of Barley Straw Residues to Avoid High Erosion and Runoff Rates on Persimmon Plantations in Eastern Spain under Low Frequency–High Magnitude Simulated Rainfall Events.” *Soil Research* 54: 154–65.

Ceschia, E, B Mary, M Ferlicoq, G Pique, D Carrer, J.-F Dejoux, and G Dedieu. 2017. “Potentiel d’atténuation Des Changements Climatiques Par Les Couverts Intermédiaires.” *Innovations Agronomiques* 62: 43–58.

Chambre d’Agriculture d’Isère. 2017. “Le Guide Des Couverts Végétaux En Interculture.”

Chambre d’agriculture des Landes. 2017. “Essai Irrigation Par Goutte à Goutte Enterré Sur Maïs.”

Charbonnier, Edwige, and Aline Fugerey-scarbel. 2019. “Colza : Quelle Valorisation Pour Des Variétés plus Ef Fi Cientes En Azote Dans Le Contexte Français ?”

Chenu, C., K. Klumpp, A. Bispo, D. Angers, C. Colnenne, and A Metay. 2014. “Stocker Du Carbone Dans Les Sols Agricoles : Évaluation de Leviers d’action Pour La France.” *Innovations Agronomiques* 37: 23–37. <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2013.816363>.

Chetan, Felicia, Teodor Rusu, Cornel Chetan, and Paula Moraru. 2016. “Influence of Soil Tillage upon Weeds, Production and Economical Efficiency of Corn Crop.” *AgroLife Scientific Journal* 5 (1): 36–43.

Cholez, Célia, and Marie-Benoît Magrini. 2014. “Cultiver Des Légumineuses à Graines En Pure Ou En Association Avec Des Céréales : Points de Vue d’acteurs Du Système Sociotechnique Agricole.” *AGIR - AGroécologie, Innovations, TeRritoires* 40: 43–59.

Colnenne-David, Caroline, and Laure Bamière. 2013. “Action. 4 Introduire Davantage de Cultures Intermédiaires , Cultures Intercalaires et Bandes Enherbées Dans Les Systèmes de Culture Pour Stocker Du Carbone Dans Les Sols et Limiter Les Émissions de N 2 O.”

“Comment Réduire Sa Dérive Grâce à Vos Buses?” n.d. Agriconomie. Accessed October 10, 2021. <https://www.agriconomie.com/publi/buse-anti-derive>.

- Constantin, J, N Beaudoin, N Meyer, R Crignon, H Tribouillois, B Mary, and E Justes. 2017. "Concilier La Réduction de La Lixiviation Nitrique, La Restitution d'azote à La Culture Suivante et La Gestion de l'eau Avec Les Cultures Intermédiaires." *Innovations Agronomiques* 62: 59–70.
- Cordeau, S, and D Moreau. 2017. "Gestion Des Adventices Au Moyen Des Cultures Intermédiaires Multi-Services: Potentiels et Limites." *Innovations Agronomiques* 62: 17–32.
- Cormier, Fabien, John Foulkes, Bertrand Hirel, David Gouache, Yvan Moëgne-Loccoz, and Jacques Le Gouis. 2016. "Breeding for Increased Nitrogen-Use Efficiency: A Review for Wheat (T. Aestivum L)." *Plant Breeding* 135 (3): 255–78. <https://doi.org/10.1111/pbr.12371>.
- Couëdel, A., C. Seassau, J. Wirth, and L. Alletto. 2017. "Potentiels de Régulation Biotique Par Allélopathie et Biofumigation ; Services et Dis-Services Produits Par Les Cultures Intermédiaires Multiservices de Crucifères." *Innovations Agronomiques* 62: 71–65.
- Cultivar. 2021. "Faites Votre Choix." 2021. <https://www.cultivar.fr/faites-votre-choix/pulverisateurs//prix-desc?page=15>.
- David Laisney. 2020. "Des Pistes Pour Moderniser Son Pulvé." Réussir Machinisme. 2020. <https://www.reussir.fr/machinisme/des-pistes-pour-moderniser-son-pulve>.
- Davis, Adam S., Jason D. Hill, Craig A. Chase, Ann M. Johanns, and Matt Liebman. 2012. "Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health." *PLoS ONE* 7 (10): 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047149>.
- Debarge, Sophie, and Alexia Tenaud. 2015. "Optimiser La Fertilisation Azotée et Valoriser Au Mieux Les Engrais Organiques." <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/3-optimiser-la-fertilisation-azotee-referance-ademe-8183.pdf>.
- Denhartigh, Cyrielle, Mélissa Dumas Dumas, and Goulven Lebahers. 2018. "Émissions de Gaz à Effet de Serre et Fertilisation Azotée - Initiatives Collectives et Territoriales." https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2018/02/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-fertilisation-azotee_initiatives-collectives-et-territoriales.pdf.
- Deumier, Jean-Marc, Bruno Molle, Cyril Dejean, Daniel Colin, and Jacques Georges. 2014. "Irrigation - Répondre Aux Nouveaux Défis." *Perspectives Agricoles*, 2014.
- Dijk, Paul Van, Philippe Martin, Rémy Ballot, and Lola Leveau. 2018. "RESTITUER ET LAISSER EN SURFACE LES RÉSIDUS DE LA CULTURE PRÉCÉDENTE." GECO. 2018. <https://geco.ecophytopic.fr/concept/>

/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252e%252eeco%252eeecophytopic%252efr%252f%252fConcept%252fRestituer_Et_Laisser_En_Surface_Les_Residus_De_La_Culture_Precedente.

Drakopoulos, Dimitrios, Andreas Kägi, Alejandro Gimeno, Johan Six, Eveline Jenny, Hans Rudolf Forrer, Tomke Musa, Giuseppe Meca, and Susanne Vogelgsang. 2020. "Prevention of Fusarium Head Blight Infection and Mycotoxins in Wheat with Cut-and-Carry Biofumigation and Botanicals." *Field Crops Research* 246 (November 2019): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107681>.

Dubois, Ludovic, and Bruno Pottiez. 2013. "Le Désherbage Mécanique." *Ecophyto*, 8.

Dumoulin, François, Hélène Baudet, Gilles Salitot, and Inma Tinoco. 2019. "Les Champs Du Possible En Lutte Biologique Sur Grandes Cultures."

Dusserre, Clément, Johanna Goudenove, Clara Jodar, and Clément Petit. 2018. "Un Stimulateur de Défense Des Plantes , Le COS-OGA."

ECAF. 2021. "Economic Benefits." 2021.

Eglin, Thomas, and Audrey Trévisiol. 2015. "Quelle Transition Écologique Pour l'agriculture ? Des Défis Multiples à Relever." *ADEME & Vous* n°41: 3–4.

Fader, M., S. Shi, W. von Bloh, A. Bondeau, and W. Cramer. 2016. "Mediterranean Irrigation under Climate Change: More Efficient Irrigation Needed to Compensate for Increases in Irrigation Water Requirements." *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (2): 953–73. <https://doi.org/10.5194/hess-20-953-2016>.

Faessel, Ludovic, Catherine Gomy, Najat Nassr, Clément Tostivint, Clémence Hipper, and Agnès Dechantteloup. 2014. "Produits de Stimulation En Agriculture Visant à Améliorer Les Fonctionnalités Biologiques Des Sols et Des Plantes – Étude Des Connaissances Disponibles et Recommandations Stratégiques." Vol. 215.

Farm Europe. 2019. "Etude Des Performances Économiques et Environnementale de l'agriculture Digitale."

———. 2020. "Mobiliser Le Fond de Relance Européen Agricole Pour Une Transition Accélérée Vers Une Agriculture Européenne de Double Performance."

Farooq, M., A. A. Bajwa, S.A. Cheema, and Zahid Ata Cheema. 2013. "Application of Moringa Allelopathy in Crop Sciences." *International Journal of Agriculture and Biology* 15 (6): 1367–78. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30595-5_20.

Farooq, Muhammad, Ali Ahsan Bajwa, Sardar A. Cheema, and Zahid A. Cheema. 2013. "Application of Allelopathy in Crop Production." *INTERNATIONAL JOURNAL OF*

AGRICULTURE & BIOLOGY 15: 1367–78. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30595-5_20.

FIGARO Irrigation Platform. 2016. “FIGARO’s Precision Irrigation Platform Presents Major Water and Energy Savings.” 2016. <http://www.figaro-irrigation.net/outputs/the-figaro-platform/en/>.

“Fonctions et Efficacité Des Zones Tampons.” n.d. Agence Française Pour La Biodiversité. Accessed October 1, 2021. <http://zonestampons.onema.fr/qu-est-ce-qu-une-zone-tampon/role-et-fonctions-d-une-zone-tampon/les-fonctions-des-zones-tampons>.

Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften, IRRIGAMA Projektgesellschaft, Fachverband Bewässerungslandbau Mitteldeutschland, Hydr Air international, Hof Grünhagen, and Agrarbetrieb Altdöbern. n.d. “Control of Additional Water Use in Crop Production – Situational, Site-Specific and Automated.” Accessed October 10, 2021. <https://eip-pi-bb.de/en/>.

Fountas, Spyros, Nikos Mylonas, Ioannis Malounas, Efthymios Rodias, Christoph Hellmann Santos, and Erik Pekkeriet. 2020. “Agricultural Robotics for Field Operations.” *Sensors* 20 (9): 2672. <https://doi.org/10.3390/s20092672>.

Garnica, Irache, Juan Antonio Lezaun, José Luis González-Andújar, Verónica Pedraza Jimenez, Daniele Antichi, Christian Frasconi, Stefano Carlesi, et al. 2020. “Experimental Trials in Europe - IWM PRAISE.”

Gavazzi, C., M. Schulz, A. Marocco, and V. Tabaglio. 2010. “Sustainable Weed Control by Allelochemicals from Rye Cover Crops: From the Greenhouse to Field Evidence.” *Allelopathy Journal* 25 (1): 259–73.

Gaviglio, Christophe. 2018. *Entretien Des Sols*. <https://www.youtube.com/watch?v=L5CjIA0CKd8&t=59s>.

Gawęda, Dorota, Małgorzata Haliniarz, Urszula Bronowicka-Mielniczuk, and Justyna Łukasz. 2020. “Weed Infestation and Health of the Soybean Crop Depending on Cropping System and Tillage System.” *Agriculture (Switzerland)* 10 (6): 1–20. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060208>.

Ghaley, Bhim B., H. Hauggaard-Nielsen, H. Høgh-Jensen, and E. S. Jensen. 2005. “Intercropping of Wheat and Pea as Influenced by Nitrogen Fertilization.” *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73 (2–3): 201–12. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-2475-9>.

Gimat, Clarisse, Jimmy Farjots, Florent Levavasseur, Renaud Bettin, Luc Bachelet, and Aline Lapiere. 2019. “Étude de Faisabilité Pour La Compensation Carbone Dans Les Sols Agricoles de Territoires Agri-Urbains.”

GNIS. n.d. “L’INSCRIPTION DES VARIÉTÉS AUX CATALOGUES OFFICIELS.” Accessed May 19,

2020. <https://www.gnis-pedagogie.org/inscription-varietes-catalogue-officiel/>.
- Gonidec, Guillaume Le. 2020. "Irrigation - Le Goutte-à-Goutte n'économise Pas Que l'eau." Réussir Machinisme. 2020. <https://www.reussir.fr/machinisme/irrigation-le-goutte-goutte-neconomise-pas-que-leau>.
- Gril, J.-J., N. Carluer, and G. Le Hénaff. 2011. "Des Zones Tampons Pour Limiter La Pollution Des Eaux Par Les Pesticides Dans Les Bassins Versants." *Techniques Sciences Méthodes*, no. 7/8: 20–32. <https://doi.org/10.1051/tsm/201107020>.
- GUILLEMAN, Émilie, Alice BAUX, Magali SORIN, Alexandra JULLIEN, and Jean ROGER-ESTRADE. 2003. "Travail Du Sol." AgroParisTech. 2003. <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE9cea/document/machinisme/services/credits.htm>.
- Guyomard, Hervé, Christian Huyghe, Jean-louis Peyraud, Jean Boiffin, Bernard Coudurier, François Jeuland, and Nicolas Urruty. 2013. "Vers Des Agricultures à Hautes Performances." *Inra* 4: 1–40. <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Rapport-Agricultures-hautes-performances#>.
- Habbib, Hazzar, Bertrand Hirel, Fabien Spicher, Frédéric Dubois, and Thierry Tétu. 2020. "In Winter Wheat (*Triticum Aestivum* L.), No-Till Improves Photosynthetic Nitrogen and Water-Use Efficiency." *Journal of Crop Science and Biotechnology* 23 (1): 39–46. <https://doi.org/10.1007/s12892-019-0122-0>.
- Haddaway, Neal R., Katarina Hedlund, Louise E. Jackson, Thomas Kätterer, Emanuele Lugato, Ingrid K. Thomsen, Helene B. Jørgensen, and Per Erik Isberg. 2017. *How Does Tillage Intensity Affect Soil Organic Carbon? A Systematic Review. Environmental Evidence*. Vol. 6. BioMed Central. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>.
- Hansen, Sissel, Randi Berland Frøseth, Maria Stenberg, Jarosław Stalenga, Jørgen E. Olesen, Maike Krauss, Paweł Radzikowski, et al. 2019. "Reviews and Syntheses: Review of Causes and Sources of N₂O Emissions and NO₃ Leaching from Organic Arable Crop Rotations." *Biogeosciences* 16 (14): 2795–2819. <https://doi.org/10.5194/bg-16-2795-2019>.
- Hiel, M.-P., S. Barbieux, J. Pierreux, C. Roisin, G. Colinet, B. Bodson, and B. Dumont. 2017. "Impact de La Gestion Des Résidus de Cultures Sur La Fertilité Des Sols et La Production Agricole." *Livre Blanc "Céréales" Février 2017*, 2017.
- Himanen, Sari J., Hanna Mäkinen, Karoliina Rimhanen, and Riitta Savikko. 2016. "Engaging Farmers in Climate Change Adaptation Planning: Assessing Intercropping as a Means to Support Farm Adaptive Capacity." *Agriculture* 6 (34): 1–13. <https://doi.org/10.3390/agriculture6030034>.
- Hirschy, Matthieu, Lola Leveau, and Julien Halska. 2018. "STIMULER LES DÉFENSES DES

VÉGÉTAUX CULTIVÉS.” GECO. 2018. https://geco.ecophytopic.fr/web/guest/concept/-/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252Fconcept%252Fstimuler_Les_Defenses_Des_Vegetaux_Cultives.

Hourcade, Delphine, David Gouache, Katia Beauchene, Christophe Michelet, Laure Duchalais, Olivier Robert, Ellen Goudemand, Denis Beghin, Mahmod Seyed Tabib Ghaffary, and Gert KEMA. 2015. “Evaluation de La Résistance À La Septoriose Par Génétique d’association.” In *Synthèse Des Programmes de Recherches FSOV*.

Hunt, Natalie D., Jason D. Hill, and Matt Liebman. 2017. “Reducing Freshwater Toxicity While Maintaining Weed Control, Profits, and Productivity: Effects of Increased Crop Rotation Diversity and Reduced Herbicide Usage.” *Environmental Science and Technology* 51 (3): 1707–17. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04086>.

Ivanova, Iliana, Angelika Zych, Niels-Erik Brokopp, Romuald Kayibanda, James Verity, Lutz Venske, Mihail Stefanov, and Agota Marczinko. 2018. “Broadband in the EU Member States: Despite Progress, Not All the Europe 2020 Targets Will Be Met.” Vol. 287.

J.V. 2021. “Les Robots Gagnent Du Terrain, Prêts à Assister Les Agriculteurs.” *Le Sillon Belge*. 2021.

Jabran, Khawar, Gulshan Mahajan, Virender Sardana, and Bhagirath S. Chauhan. 2015. “Allelopathy for Weed Control in Agricultural Systems.” *Crop Protection* 72: 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.03.004>.

Jaunard, D. 2020. “Pulvérisation: Trouver Le Bon Compromis Entre La Réduction de La Dérive et l’efficacité Des Traitements.” *Le Sillon Belge*. 2020. <https://www.agriconomie.com/publi/buse-anti-derive>.

Jeanneret, Philippe, John M Holland, Wildlife Conservation Trust, A C Moonen, and Jozsef Kiss. 2017. “Résultats Du Projet EU FP7 QuESSA Quantification of Ecological Services for Sustainable Agriculture Auteurs : Nom et Prénom,” no. January 2018: 9–10.

Jorgensen, Lise N., F. Van Den Bosch, R. P. Oliver, T. M. Heick, and N. D. Paveley. 2017. “Targeting Fungicide Inputs According to Need.” *Annual Review of Phytopathology* 55: 181–203. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035357>.

Julien, Cécile. 2018. “Débuts Prometteurs En Grandes Cultures Pour Ecorobotix.” *Terre-Net*. 2018. <https://www.terre-net.fr/partenaire/innovation-et-technologie/article/debuts-prometteurs-en-grandes-cultures-pour-ecorobotix-2894-133739.html>.

Justes, E, N. Beaudoin, P. Bertuzzi, R. Charles, J. Constantin, C. Dürr, C. Hermon, et al. 2012. “Réduire Les Fuites de Nitrate Au Moyen de Cultures Intermédiaires.”

Justes, Eric, and Guy Richard. 2017. “Contexte , Concepts et Définition Des Cultures

Intermédiaires Multi-Services.” *Innovations Agronomiques* 62: 1–15.

- Kanatas, P. J., I. S. Travlos, J. Gazoulis, N. Antonopoulos, A. Tsekoura, A. Tataridas, and S. Zannopoulos. 2020. “The Combined Effects of False Seedbed Technique, Post-Emergence Chemical Control and Cultivar on Weed Management and Yield of Barley in Greece.” *Phytoparasitica* 48 (1): 131–43. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00783-x>.
- Kandhro, M. N., S. Tunio, I. Rajpar, and Q. Chachar. 2014. “Allelopathic Impact of Sorghum and Sunflower Intercropping on Weed Management and Yield Enhancement in Cotton.” *Sarhad J. Agric.* 30 (3): 1–128.
- Kaye, J P, and M Quemada. 2017. “Using Cover Crops to Mitigate and Adapt to Climate Change: A Review.” *Agronomy for Sustainable Development* 37: 4.
- Kernecker, Maria, Andrea Knierim, Angelika Wurbs, Teresa Kraus, and Friederike Borges. 2019. “Experience versus Expectation: Farmers’ Perceptions of Smart Farming Technologies for Cropping Systems across Europe.” *Precision Agriculture*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>.
- Khan, Naeem, Asghari M.D. Bano, and Ali Babar. 2020. *Impacts of Plant Growth Promoters and Plant Growth Regulators on Rainfed Agriculture*. *PLoS ONE*. Vol. 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231426>.
- Koehler-Cole, Katja, Sydney E. Everhart, Yan Gu, Christopher A. Proctor, Margarita Marroquin-Guzman, Daren D. Redfearn, and Roger W. Elmore. 2020. “Is Allelopathy from Winter Cover Crops Affecting Row Crops?” *Agricultural & Environmental Letters* 5 (1): 1–6. <https://doi.org/10.1002/ael2.20015>.
- Koricheva, Julia, and Dexter Hayes. 2018. “The Relative Importance of Plant Intraspecific Diversity in Structuring Arthropod Communities: A Meta-analysis.” Edited by Charles Fox. *Functional Ecology* 32 (7): 1704–17. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13062>.
- Kritikos, Mihalís. 2017. “Precision Agriculture in Europe: Legal, Social and Ethical Considerations.” Bruxelles. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/603207/EPRS_STU\(2017\)603207_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/603207/EPRS_STU(2017)603207_EN.pdf).
- Kürsten, Ernst. 2020. “Potentials of Carbon Sequestration with Landscape Design Integrating Carbon Farming (3N).”
- Labarthe, Pierre, François Coleno, Aline Fugerey-scarbel, and Mourad Hannachi. 2018. “Notes et Études Socio-Économiques.”
- Labreuche, Jérôme, and Thibaud Deschamps. 2016. “LE BROYAGE DES RÉSIDUS DE MAÏS RÉDUIT LES RISQUES DE CONTAMINATION EN DONLE BROYAGE DES RÉSIDUS DE MAÏS

- RÉDUIT LES RISQUES DE CONTAMINATION EN DON.” Arvalis. 2016.
- Lacas, Jean-Guillaume, Marc Voltz, Véronique Gouy, Nadia Carluer, and Jean-Joël Gril. 2005. “Using Grassed Strips to Limit Pesticide Transfer to Surface Water: A Review.” *Agronomy for Sustainable Development* 25 (2): 253–66. <https://doi.org/10.1051/agro:2005001>.
- Lamé, Alice, Marie-Hélène Jeuffroy, Elise Pelzer, and Jean-Marc Meynard. 2015. “Les Agriculteurs Sources d’innovations : Exemple Des Associations Pluri-Spécifiques Dans Le Grand Ouest de La France.” *Agronomie Environnement & Sociétés* 5 (2): 47–54. http://www.ghbook.ir/index.php?name=فرهنگ و رسانه های نوین&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chckhashk=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component.
- Larroudé, Philippe, and Jean-Baptiste Thibord. 2018. “LA CONFUSION SEXUELLE, Une Piste Contre Les Taupins?” *Perspectives Agricoles* 458: 54–58.
- Lazartigues, Angélique. 2010. “PESTICIDES ET POLYCULTURE D’ETANG : DE L’EPANDAGE SUR LE BASSIN VERSANT AUX RESIDUS DANS LA CHAIR DE POISSON.”
- Lechenet, Martin, Vincent Bretagnolle, Christian Bockstaller, François Boissinot, Marie Sophie Petit, Sandrine Petit, and Nicolas M. Munier-Jolain. 2014. “Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming.” *PLoS ONE* 9 (6): 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097922>.
- Lecocq, Raphaël. 2016. “Des Pulvérisateurs et Des Buses Dans Le Vent.” Réussir Machinisme. 2016. <https://www.reussir.fr/machinisme/des-pulverisateurs-et-des-buses-dans-le-vent>.
- . 2019. “Les Manches à Air, Du Vent Contre La Dérive.” Plein Champ. 2019. <https://www.pleinchamp.com/actualite/machinisme~les-manches-a-air-du-vent-contre-la-derive>.
- Li, C., E. Hoffland, T. W. Kuyper, Y. Yu, C. Zhang, H. Li, F. Zhang, and W. van der Werf. 2020. “Syndromes of Production in Intercropping Impact Yield Gains.” *Nature Plants* 6: 653–60.
- Liger, L, A Martin, C Guillemain, C Margoum, P Lafrance, V Gouy, Liger Lucie, et al. 2015. “Devenir Des Pesticides Infiltrés Au Sein d’une Bande Enherbée : Potentiel de Contamination d’une Nappe Superficielle Sous-Jacente.” In *45e Congrès Du Groupe Français Des Pesticides, May 2015, Versailles, France.*, 6. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253670/document>.
- Lipenite, Inara, Aldis Karklins, and Antons Ruza. 2018. “SOIL MINERAL NITROGEN DYNAMICS IN RELATION TO TILLAGE METHODS AND CROP ROTATION” 1 (2007): 82–93. <https://doi.org/10.15544/njfcgress.2018.12>.
- Lithourgidis, A. S., K. V. Dhima, C. A. Damalas, I. B. Vasilakoglou, and I. G. Eleftherohorinos. 2006.

“Tillage Effects on Wheat Emergence and Yield at Varying Seeding Rates, and on Labor and Fuel Consumption.” *Crop Science* 46 (3): 1187–92. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.09-0321>.

Lognoul, M. 2020. “N₂O Exchanges By Three Agricultural Plots in Southern Belgium : Dynamics and Response To Meteorological Drivers and Agricultural Practices.” UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLOUX AGRO-BIO TECH. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26633.47203>.

Lopes, Thomas, Séverin Hatt, Qinxuan Xu, Julian Chen, Yong Liu, and Frédéric Francis. 2016. “Wheat (*Triticum Aestivum* L.)-Based Intercropping Systems for Biological Pest Control.” *Pest Management Science* 72 (12): 2193–2202. <https://doi.org/10.1002/ps.4332>.

Lorgeou, Josiane, and Philippe Du Cheyron. 2019. “Mélanges de Variétés : Des Différences Rarement Significatives.” Arvalis. 2019.

Lowenberg-DeBoer, James, Iona Yuelu Huang, Vasileios Grigoriadis, and Simon Blackmore. 2020. “Economics of Robots and Automation in Field Crop Production.” *Precision Agriculture* 21 (2): 278–99. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>.

Lutz, Femke, Tobias Herzfeld, Jens Heinke, Susanne Rolinski, Sibyll Schaphoff, Werner von Bloh, Jetse J. Stoorvogel, and Christoph Müller. 2019. “Simulating the Effect of Tillage Practices with the Global Ecosystem Model LPJmL (Version 5.0-Tillage).” *Geoscientific Model Development* 12 (6): 2419–40. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2419-2019>.

Machet, Jean-Marie, Jean-François Dobrecourt, André Chabert, Rémy Ballot, and Lola Leveau. 2018. “RESTITUER ET INCORPORER LES RÉSIDUS DE LA CULTURE PRÉCÉDENTE.” GECO. 2018. https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fRestituer_Et_Incorporer_Les_Residus_De_La_Culture_Precedente.

Mamine, Fateh, and M’hand Farès. 2020. “Barriers and Levers to Developing Wheat-Pea Intercropping in Europe: A Review.” *Sustainability (Switzerland)* 12 (6962): 19. <https://doi.org/10.3390/SU12176962>.

Martin-Monjaret, Claire. 2019. “Le Tournesol : Une Culture Qui s’intègre à Toutes Les Exploitations Agricoles.” Terres Inovia. 2019.

Matthieu Hirschy. 2020. “Réaliser Des Faux-Semis Pendant l’interculture.” GECO. 2020. https://geco.ecophytopic.fr/geco/Concept/Realiser_Des_Faux-semis_Pendant_L_Interculture.

Maumene, C, D Gaucher, Annette Penaud, A Siah, and A Menil. 2018. “GRANDES CULTURES : LES SDP EN PRATIQUE.” In *Colloque Elicitra - Natural Products & Biocontrol*, 25.

- Mayerová, Markéta, Mikuláš Madaras, and Josef Soukup. 2018. "Effect of Chemical Weed Control on Crop Yields in Different Crop Rotations in a Long-Term Field Trial." *Crop Protection* 114 (June): 215–22. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.08.001>.
- Mischler, P., and J. Pernel. 2011a. "Le Retard de La Date de Semis Des Céréales d'hiver." *Agro-Transfert*, 2011.
- . 2011b. "Le Travail Superficiel Du Sol En Interculture." *Agro-Transfert*, 2011.
- Moureaux, Benoit. 2020. "LE FAUX-SEMIS EST-IL INCONTOURNABLE ?" Arvalis. 2020. <https://www.arvalis-infos.fr/le-faux-semis-est-il-incontournable--@/view-25575-arvarticle.html>.
- Naïo Technologies. 2016. "Les Avantages Pratiques Du Binage Robotique." 2016.
- Neupane, Jasmine, and Wenxuan Guo. 2019. "Agronomic Basis and Strategies for Precision Water Management: A Review." *Agronomy* 9 (2): 87. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020087>.
- Nichols, Virginia, Nele Verhulst, Rachael Cox, and Bram Govaerts. 2015. "Weed Dynamics and Conservation Agriculture Principles: A Review." *Field Crops Research* 183: 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>.
- Normandie, Dreal. 2016. "Optimisation de La Fertilisation Azotée."
- OFAG. 2019. "Contribution Pour l'utilisation de Techniques d'application Précise Des Produits Phytosanitaires." 2019. <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/direktzahlungen/ressourceneffizienzbeitraege/beitrag-fuer-den-einsatz-von-praeziser-applikationstechnik.html>.
- Panasiewicz, Katarzyna, Agnieszka Faligowska, Grazyna Szymanska, Jerzy Szukała, Karolina Ratajczak, and Hanna Sulewska. 2020. "The Effect of Various Tillage Systems on Productivity of Narrow-Leaved Lupin-Winter Wheat-Winter Triticale-Winter Barley Rotation." *Agronomy* 10 (2). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020304>.
- Parent, Boris, Claude Welcker, and François Tardieu. 2019. "Changement Climatique : Des Rendements Maintenus En Adaptant La Précocité (Dossier : Maïs, Les Conditions de La Réussite)." *Perspectives Agricoles* 462: 38–41.
- Pelzer, Elise, Mathieu Bazot, David Makowski, Guénaëlle Corre-Hellou, Christophe Naudin, Mehdi Al Rifaï, Edouard Baranger, et al. 2012. "Pea–Wheat Intercrops in Low-Input Conditions Combine High Economic Performances and Low Environmental Impacts." *European Journal of Agronomy* 40 (July): 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.010>.

- Perriot, Benjamin, and Damien Gaudillat. 2013. "Des Pulvérisateurs Récents et Des Volumes de Bouillie En Baisse." *Perspectives Agricoles*, 2013. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/7b/f3/29/72/404_7056433838225986207.pdf.
- Petit, A., N. Aveline, and B. Molot. 2020. "LES SOLUTIONS ALTERNATIVES AUX INTRANTS PHYTOSANITAIRES EN VITICULTURE." 2020. [file:///Users/valeria/Desktop/Efficiency des intrants/Pesticides/Pesticides biblio/biocontrôle/Les solutions alternatives aux intrants phytosanitaires en viticulture - IFV Occitanie.webarchive](file:///Users/valeria/Desktop/Efficiency%20des%20intrants/Pesticides/Pesticides%20biblio/biocontr%C3%B4le/Les%20solutions%20alternatives%20aux%20intrants%20phytosanitaires%20en%20viticulture%20-%20IFV%20Occitanie.webarchive).
- Philips, Dom. 2017. "'People Are Getting Poorer': Hunger and Homelessness as Brazil Crisis Deepens." *The Guardian*. 2017. <https://www.theguardian.com/global-development/2017/jul/19/people-getting-poorer-hunger-homelessness-brazil-crisis>.
- Poeplau, C, and A Don. 2015. "Carbon Sequestration in Agricultural Soils via Cultivation of Cover Crops—A Meta-Analysis." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, no. 200: 33–41.
- Preissel, Sara, Moritz Reckling, Johann Bachinger, and Peter Zander. 2017. "Introducing Legumes into European Cropping Systems: Farm-Level Economic Effects." In *Legumes in Cropping Systems*, 209–25. <https://doi.org/10.1079/9781780644981.0000>.
- "Quel Système d'irrigation Choisir ?" 2017. SOVERDI. 2017. <http://soverdi.fr/quel-systeme-irrigation-choisir>.
- Quenin, Hélène. 2020. "Tolérance Au Stress Hydrique : « un Aspect Pas Encore Contrôlé, Ni Certifié »." *Terre-Net Média*. 2020. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique-culturale/article/tolerance-au-stress-hydrique-un-aspect-pas-encore-controle-ni-certifie-217-165793.html>.
- RIVIÈRE-WEKSTIEN, Gil. 2015. "Le Biocontrôle, Des Solutions Pour Quelle Échéance ?" *Agriculture et Environnement*. 2015.
- Rotolo, Caterina, Rita M. De Miccolis Angelini, Crescenza Dongiovanni, Stefania Pollastro, Giulio Fumarola, Michele Di Carolo, Donato Perrelli, Patrizia Natale, and Francesco Faretra. 2018. "Use of Biocontrol Agents and Botanicals in Integrated Management of Botrytis Cinerea in Table Grape Vineyards." *Pest Management Science* 74 (3): 715–25. <https://doi.org/10.1002/ps.4767>.
- Sandén, T., H. Spiegel, H.-P. Stüger, N. Schlatter, H.-P. Haslmayr, L. Zavattaro, C. Grignani, et al. 2018. "European Long-Term Field Experiments: Knowledge Gained about Alternative Management Practices." Edited by Matt Aitkenhead. *Soil Use and Management* 34 (2): 167–76. <https://doi.org/10.1111/sum.12421>.
- Sarthou, Jean-Pierre. 2016. "Infrastructure Agroécologique : Définition." *Dictionnaire d'Agroécologie*. 2016. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/infrastructure-agroecologique-2/>.

- Savary, Christian, and Philippe Legrain. 2020. "Les Robots En Grandes Cultures." *Chambre d'agriculture de Normandie*, 2020. https://normandie.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Normandie/506_Fichiers-communs/PDF/PEP/pep-gc-robots.pdf.
- Sawyer, Geoff, Chris Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov. 2021. "Making Wine in France."
- Schöneberg, Torsten, Charlotte Martin, Felix E. Wettstein, Thomas D. Bucheli, Fabio Mascher, Mario Bertossa, Tomke Musa, Beat Keller, and Susanne Vogelgsang. 2016. "Fusarium and Mycotoxin Spectra in Swiss Barley Are Affected by Various Cropping Techniques." *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment* 33 (10): 1608–19. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1219071>.
- SERRA-WITTLING, Claire, Silvia Baralla, Inmaculada Bravo-Dominguez, Katrin Drastig, Graziano GHINASSI, Stéphane Guillot, Attila Nagy, Viktor Nagy, Zornitsa Popova, and Sevilay Topçu. 2020. "Adaptation de l'irrigation Au Changement Climatique Dans l'Union Européenne : Les Actions Engagées Par Les États Membres Pour Économiser l'eau." *Sciences Eaux & Territoires*, 8–17. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.5.02>.
- Serra-Wittling, Claire, and Bruno Molle. 2017. "Evaluation Des Économies d'eau à La Parcelle Réalisables Par La Modernisation Des Systèmes d'irrigation." https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport_Efficience_Version_déf_TEXTE%2BANNEXES.pdf.
- . 2020. "Potentialités d'économies d'énergie et de Main d'œuvre Au Travers de La Modernisation Des Systèmes d'irrigation."
- Serra-Wittling, Claire, Bruno Molle, and Bruno Cheviron. 2019. "Plot Level Assessment of Irrigation Water Savings Due to the Shift from Sprinkler to Localized Irrigation Systems or to the Use of Soil Hydric Status Probes. Application in the French Context." *Agricultural Water Management* 223 (August): 105682. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.017>.
- Shahzad, Muhammad, Khawar Jabran, Mubshar Hussain, Muhammad Aown Sammar Raza, Leonard Wijaya, Mohamed A. El-Sheikh, and Mohammed Nasser Alyemeni. 2021. "The Impact of Different Weed Management Strategies on Weed Flora of Wheat-Based Cropping Systems." *PLoS ONE* 16 (2 February): 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247137>.
- Skakelja, Neda, and Derek McGlynn. 2018. "Pour Une Utilisation Efficace Des Ressources." *European Network for Rural Development*, 2018.
- Snyder, Lauren D., Miguel I. Gómez, and Alison G. Power. 2020. "Crop Varietal Mixtures as a Strategy to Support Insect Pest Control, Yield, Economic, and Nutritional Services." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4 (May): 1–14. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00060>.

- SoCo Project Team. 2009. *Addressing Soil Degradation in EU Agriculture: Relevant Processes, Practices and Policies*. JRC Scientific and Technical Reportsechnical Reports. <https://doi.org/10.2791/69723>.
- Sorel, Aude. 2019. "Ils Sont Prêts à Investir Les Exploitations de Grandes Cultures !" Terre-Net. 2019. <https://www.terre-net.fr/materiel-agricole/tracteur-quad/article/les-robots-agricoles-prets-a-investir-les-exploitations-de-grandes-cultures-207-164619.html>.
- Soto, Iria, Andrew Barnes, Athanasios Balafoutis, Bert Beck, Berta Sánchez, Jurgen Vangeyte, Spyros Fountas, Tamme Van der Wal, Vera Eory, and Manuel Gómez-Barbero. 2019. "The Contribution of Precision Agriculture Technologies to Farm Productivity and the Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in the EU." *Publications Office of the European Union*. Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/016263>.
- Stagnari, Fabio, Albino Maggio, Angelica Galieni, and Michele Pisante. 2017. "Multiple Benefits of Legumes for Agriculture Sustainability: An Overview." *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 4 (2): 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>.
- Stamatiadis, Stamatis. 2013. "HydroSense - Innovative Precision Technologies for Optimised Irrigation and Integrated Crop Management in a Water-Limited Agrosystem." *Life-Environment Projects*. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3466&docType=pdf.
- Swieter, Anita, Maren Langhof, and Justine Lamerre. 2021. "Competition, Stress and Benefits: Trees and Crops in the Transition Zone of a Temperate Short Rotation Alley Cropping Agroforestry System." *Journal of Agronomy and Crop Science*, September. <https://doi.org/10.1111/jac.12553>.
- "Systèmes d'irrigation." n.d. ICS. Accessed October 10, 2021. <https://www.ics-agri.com/irrigation-goutte-a-goutte-en-grandes-cultures-des-regions-chaudes-mais-ble.html>.
- Tailleur, Aurélie, Cécile Le Gall, Vincent Blazy, and Elise Lorinquer. 2020. "Emissions Directes Des Sols Agricoles (Hors Variation de Stock de Carbone)." In *Guide GESt'TIM+*, 1–56.
- Tanveer, Mohsin, Shakeel Ahmad Anjum, Saddam Hussain, Artemi Cerdà, and Umair Ashraf. 2017. "Relay Cropping as a Sustainable Approach: Problems and Opportunities for Sustainable Crop Production." *Environmental Science and Pollution Research* 24 (8): 6973–88. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8371-4>.
- TEBRÜGGE, F., and A. BÖHRNSEN. 2001. "Farmers' and Experts' Opinion on No-Tillage in West-Europe and Nebraska (USA)." In *Conservation Agriculture, a Worldwide Challenge. First World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, Spain*, 61–69.

- Thomas, Frédéric. 2007. "L'AZOTE En TCS et SD: Beaucoup de Bénéfices, Mais Une Gestion à Adapter." *Techniques Culturelles Simplifiées*, 2007. http://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/TCS44_azote_tcs.pdf.
- Thromas, Marie, Pierre Bompard, and Simon Giuliano. 2018. "Engrais Vert : Définition." *Dictionnaire d'Agroécologie*. 2018. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/engrais-vert/>.
- "Top Sale Center Pivot Irrigation System In Europe." n.d. One Aqua. Accessed October 10, 2021. <https://www.ht-bauer.com/center-pivot-irrigation-system/58879815.html>.
- Townsend, Toby J., Stephen J. Ramsden, and Paul Wilson. 2016. "Analysing Reduced Tillage Practices within a Bio-Economic Modelling Framework." *Agricultural Systems* 146: 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.04.005>.
- Trenkel, M.E. 2010. "Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture." In *International Fertilizer Industry Association (IFA)*. Paris.
- Trezzi, Michelangelo Muzell, Ribas Antônio Vidal, Alvadi Antônio Balbinot Junior, Henrique von Hertwig Bittencourt, and Antonio Pedro da Silva Souza Filho. 2016. "Allelopathy: Driving Mechanisms Governing Its Activity in Agriculture." *Journal of Plant Interactions* 11 (1): 53–60. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1159342>.
- Vach, Milan, Lukáš Hlisnikovský, and Miloslav Javůrek. 2018. "The Effect of Different Tillage Methods on Erosion." *Agriculture* 64 (1): 28–34. <https://doi.org/10.2478/agri-2018-0003>.
- Vallavieille-Pope, C., S. Saint-Jean, C Gigot, L Huber, M Leconte, C Maumené, P Cheyron, G Couleaud, and B Kerhornou. 2016. "Concevoir Des Associations Variétales de Blé Pour Réduire La Progression Épidémique de La Septoriose : Approche Théorique et Expérimentations Au Champ." *Innovations Agronomiques* 50: 157–70. <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/5893/44166/file/Vol50-14-Pope.pdf>.
- Verdier, J.L., A. Rodriguez, F. Vuillemin, I. Barrier, G. Perdrieux, C. Baudinet, and B. Delmas. 2019. "Réseau ECOHERBMIP : Faisabilité, Performance et Durabilité de Systèmes de Cultures Économiques En Herbicides." *Innovations Agronomiques* 76: 155–67.
- Véricel, G., S. Dubois, R. Duval, F. Flénet, L. Fontaine, L. Fourrié, B. Leclerc, et al. 2018. "Impact de l'introduction Des Légumineuses Dans Les Systèmes de Culture Sur Les Émissions de Protoxyde d'azote." *Innovations Agronomiques* 63: 211–29.
- Verschwele, Arnd. 2021. "Innovations in Landscape Research Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes." In *Innovations in Landscape Research Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*, 679–91.

Viel, Lucie. 2014. "Maintenir Un Niveau Bas En Intrants En Combinant Tous Les Leviers."

Viguié, Loïc, and Guénaëlle Hellou. 2019. "Combining Temporal and Spatial Diversification to Improve Economic, Environmental and Social Performances in European Cropping Systems." In *DiverIMPACTS European Conference on Crop Diversification*, 70–71. Budapest.

Vuillemin, Fanny, and Franck Duroueix. 2020. "Désherbage Mécanique Ou Mixte Du Colza Avec Herse Étrille." Terres Inovia. 2020.

Weigel, Robert, Thomas Koellner, Patrick Poppenborg, and Christina Bogner. 2018. "Crop Diversity and Stability of Revenue on Farms in Central Europe: An Analysis of Big Data from a Comprehensive Agricultural Census in Bavaria." *PLoS ONE* 13 (11): 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207454>.

"Whealbi." 2021. Whealbi. 2021. <https://www.whealbi.eu/project/strategy/>.

Woźniak, A., and M. Soroka. 2018. "Effect of Crop Rotation and Tillage System on the Weed Infestation and Yield of Spring Wheat and on Soil Properties." *Applied Ecology and Environmental Research* 16 (3): 3087–96. https://doi.org/10.15666/aeer/1603_30873096.

Wozniak, Andrzej, Anna Nowak, Małgorzata Haliniarz, and Dorota Gawęda. 2019. "Yield and Economic Results of Spring Barley Grown in Crop Rotation and in Monoculture." *Polish Journal of Environmental Studies* 28 (4): 2441–48. <https://doi.org/10.15244/pjoes/90634>.

Zarco-Tejada, Pablo J., Neil Hubbard, and Philippe Loudjani. 2014. "Precision Agriculture : An Opportunity for Eu Farmers-Potential Support with the CAP." Bruxelles.

Zhai, Zhaoyu, José Fernán Martínez, Victoria Beltran, and Néstor Lucas Martínez. 2020. "Decision Support Systems for Agriculture 4.0: Survey and Challenges." *Computers and Electronics in Agriculture* 170 (January): 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.

Table des tableaux

Tableau 1 - Évolution de la lixiviation à l'automne suivant une culture de pois ou de colza, par rapport à une culture de céréale (Beillouin et al. 2017)	12
Tableau 2 - Évolution de la lixiviation à l'automne suivant une culture de céréales précédée d'un pois ou d'un colza par rapport à une céréale précédée d'une céréale (Beillouin et al. 2017) ..	12
Tableau 3 - Simulation de perte par lixiviation à l'échelle de successions culturales, en France sur 20 ans (Beillouin et al. 2017)	12
Tableau 4 - Quantité d'azote minéral dans le sol après la récolte (Pelzer et al. 2012)	16
Tableau 5 - Efficacité des cultures intermédiaires contre les adventices	20
Tableau 6 - Efficacité des cultures intermédiaires contre les maladies telluriques (Couëdel et al. 2017)	21
Tableau 7 - Capacité de stockage de carbone par les cultures intermédiaires	24
Tableau 8 - Piégeage équivalent de CO ₂ atmosphérique par l'albédo des cultures intermédiaires par rapport à un sol nu (Carrer et al. 2018).....	25
Tableau 9 - Efficacité des faux-semis selon le type d'outil utilisé, (Arvalis, ITAB), figure issue de (Matthieu Hirschy 2020)	28
Tableau 10 - Période de levée de quelques adventices après une récolte d'été, tableau issu de (Matthieu Hirschy 2020)	28
Tableau 11 - Efficacité du semi tardif par rapport à un semi à date normale (Compilation des résultats de 15 références, Lheureux et Mischlet, 2008), tableau issu de Mischler and Pernel (2011a).....	29
Tableau 12 - Coûts de différentes stratégies de faux-semis, tableau issu de (Mischler and Pernel 2011b).....	31
Tableau 13 - Effets des résidus de culture sur les adventices	35
Tableau 14 - Efficacité des mulchs associés à d'autres pratiques sur les insectes foreurs (Labreuche and Deschamps 2016).....	36
Tableau 15 - Effets des mulchs sur l'incidence de la fusariose et la présence de mycotoxines dans les grains de blé en Suisse (Drakopoulos et al. 2020)	36
Tableau 16 - Effets des mulchs sur les rendements de la culture suivante	38
Tableau 17 - Comparaison des résultats obtenus avec ou sans mélanges variétaux.....	48
Tableau 18 - Effets des TCS et TSL sur la présence d'adventices par rapport à un travail du sol conventionnel.....	53

Tableau 19 - Effets des TCS et TSL sur l'incidence des maladies fongiques par rapport à un travail du sol conventionnel.....	53
Tableau 20 - Effet du type de travail du sol sur la capacité de rétention d'eau en fonction du type de sol et du taux de matière organique (Lutz et al. 2019)	55
Tableau 21 - Comparaison de l'effet des TCS sur le temps de travail par rapport à un travail conventionnel du sol.....	56
Tableau 22 - Comparaison de l'effet des TSL sur le temps de travail par rapport à un travail conventionnel du sol.....	56
Tableau 23 - Consommation de carburant en TCS par rapport à un travail conventionnel du sol	57
Tableau 24 - Consommation de carburant en TSL par rapport à un travail conventionnel du sol	57
Tableau 25 - Comparaison de l'effet du labour sans limite de profondeur et avec retournement, du TCS et des TSL sur la concentration des sols en COS (Haddaway et al. 2017)	59
Tableau 26 - Efficacité des principaux types de buse sur la réduction de la dérive et sur la consommation de produits phytosanitaires (Jaunard 2020; Perriot and Gaudillat 2013).....	63
Tableau 27 - Économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation en maïs et autres grandes cultures, tableau issu de (Serra-Wittling and Molle 2017)	66
Tableau 28 - Efficience des systèmes d'irrigation selon la hauteur des buses (Soto et al. 2019)	66
Tableau 29 - Temps de main d'œuvre total pour une campagne avec différents systèmes d'irrigation en grandes cultures (GGE : goutte-à-goutte enterré, GGS : goutte-à-goutte de surface). D'après Pagliarino (2012) et Arvalis (2017), tableau issu de (Serra-Wittling and Molle 2017)	67
Tableau 30 - Investissements et charges de différents systèmes d'irrigation. Les installations d'irrigation par goutte-à-goutte, tableau issu de (Deumier et al. 2014).....	68
Tableau 31 - Ordre de grandeur des économies d'énergies réalisables en grande culture (Serra-Wittling and Molle 2020)	69
Tableau 32 - Économies moyennes des charges liées aux pesticides permises par les prescriptions des OAD (Farm Europe 2019)	76
Tableau 33 - Économies moyennes des charges liées à la fertilisation permises par les prescriptions des OAD en Europe (Farm Europe 2019)	77
Tableau 34 - Effets des OAD sur les rendements et les produits bruts en moyenne (Farm Europe 2019)	78

Tableau 35 - Synthèse des économies de pesticides réalisées grâce à la pulvérisation de précision observée dans la revue de Balafoutis et al. (2017)	82
Tableau 36 - Impact moyen perçu par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée et de la pulvérisation de précision sur le temps de travail (Soto et al. 2019)	85
Tableau 37 - Réduction des émissions de N ₂ O suite à l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification selon différents types de sol (Byrne et al. 2020)	93
Tableau 38 - Effets des produits de biocontrôle sur le rendement (Dumoulin et al. 2019) ...	101
Tableau 39 - Effet d'une culture diversifiée sur la culture de céréale suivante par rapport à deux cultures de céréales consécutives, d'après (Preissel et al. 2017)	110

Table des figures

Figure 1 - Les pratiques étudiées et les intrants dont elles affectent l'usage	7
Figure 2 - Gestion des adventices lors d'associations de cultures (Lamé et al. 2015)	15
Figure 3 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (Machine guidance) et de la pulvérisation de précision (Variable rate N-fertilisation) sur l'utilisation d'engrais azotés. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de (Soto et al. 2019).....	72
Figure 4 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (Machine guidance) et de la pulvérisation de précision (Variable rate N-fertilisation) sur le rendement. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de (Soto et al. 2019)	73
Figure 5 – Les cinq niveaux de l'agriculture digitale.....	75
Figure 6 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (Machine guidance) et de la Fertilisation à taux variable (Variable rate N-fertilisation) sur l'utilisation d'engrais azotés. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de Soto et al. (2019).....	83
Figure 7 - Impacts perçus par les agriculteurs lors de l'utilisation de la direction assistée (machine guidance) et de la Fertilisation à taux variable (Variable rate N-fertilisation) sur le rendement. Les impacts moyens sont indiqués entre parenthèses, figure issue de (Soto et al. 2019)	84

Liste des sigles et acronymes

C	Carbone
CIPAN	Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate
CIVE	Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique
CO ₂	Dioxyde de Carbone
COS	Carbone Organique du Sol
CTF	Controlled Traffic Farming
DPAE	Débit Proportionnel à l'Avancement à contrôle Électronique
DPM	Débit Proportionnel au Moteur
eCO ₂	équivalent CO ₂
ETM	Éléments Traces Métalliques
GES	Gaz à Effet de Serre
GGE	Goutte-à-Goutte Enterré
GGs	Goutte-à-goutte de Surface
GPS	Géolocalisation Par Satellite
h	Heure
h/ha	Heure par hectare
ha	Hectare
IAE	Infrastructures Agro-Ecologiques
IFT	Indice de Fréquence des Traitements
ITAB	Institut Technique de l'Agriculture Biologique
LEPA	Low Elevation-Energy Precision Application
LER	Land Equivalent Ratio
LESA	Low Elevation-Energy Spay Application
MESA	Mid Elevation Spray Application
MO	Matières Organiques
N	Azote
N/ha	Azote par Hectare
N ₂ O	Protoxyde d'Azote
NH ₃	Ammoniac
NH ₃ -N	Azote Ammoniacal
NH ₄ ⁺	Ammonium
NPK	Azote Potassium Magnésium
NUE	Nitrate Use Efficiency (Efficience d'Utilisation de l'Azote)
OGM	Organisme Génétiquement Modifié
PAC	Politique Agricole Commune
q	Quintaux
q/ha	Quintaux par hectare
SDN	Stimulateurs de Défenses Naturelles
SDP	Stimulateurs de Défense des Plantes
T	Tonne
TCS	Techniques Culturelles Simplifiées
TSL	Techniques Sans Labour
UA	Unité Azoté
UAVFA	Unmanned Aerial Vehicle Flying Aerial Material
USA	États-Unis
VATE	Valeur Agronomique, Technologique et Environnementale

VRI
ZT

Variable Rate Irrigation (Irrigation à Taux Variable)
Zones Tampons

