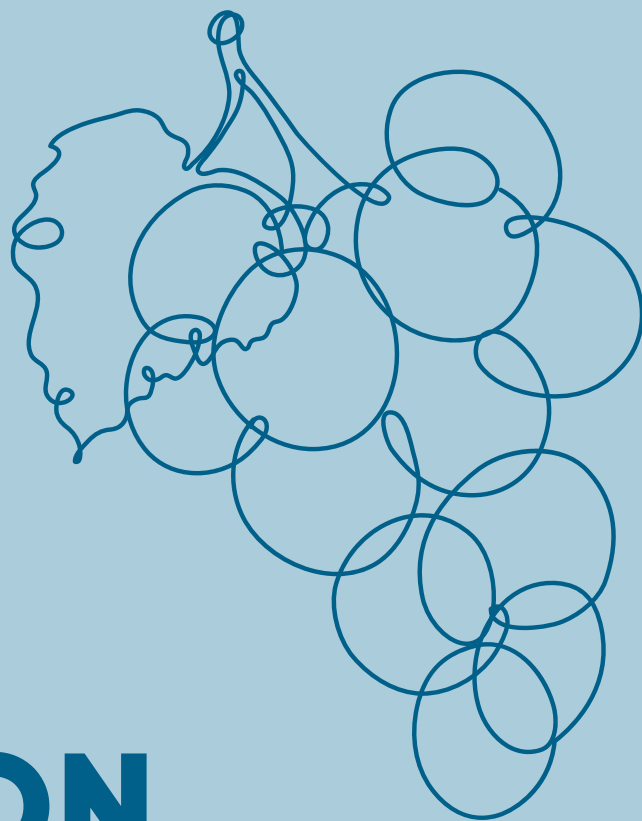
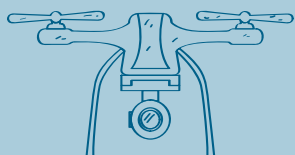


# LEVIER POUR UNE TRANSITION



VERS DES  
SYSTEMES  
VITICOLES  
PLUS DURABLES





# Anaïs 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. Parmi les différents départements du think tank, le Wine Institute concentre ses travaux sur la cohérence entre les évolutions en cours au sein du secteur viticole et les politiques publiques mises en place à l'échelle européenne.*

## Table des matières

Synthèse .....	1
Contexte .....	1
I. Production viticole européenne .....	1
A. Surface et zones géographiques.....	1
B. Production .....	2
C. Les principaux intrants .....	2
II. Le secteur viticole face aux enjeux climatiques.....	3
III. Le secteur viticole face aux enjeux environnementaux .....	4
IV. Réponses politiques aux enjeux climatiques et environnementaux .....	4
V. Le secteur viticole face aux enjeux économiques.....	5
Méthodologie.....	6
Résultats .....	9
I. Modification des systèmes viticoles .....	9
A. Occupation du sol.....	9
1. Enherbement.....	9
a. Résultats obtenus.....	9
b. Remarques.....	12
c. Bilan .....	12
2. Paillage .....	12
a. Résultats obtenus.....	13
b. Bilan .....	16
3. Agroforesterie et haies .....	16
c. Résultats obtenus.....	17
d. Bilan .....	19
C. Sélection variétale .....	20

1.	Résultats obtenus.....	20
2.	Remarques.....	22
3.	Bilan.....	22
II.	Effcience de l'usage d'intrants .....	22
A.	Pulvérisation confinée.....	22
1.	Résultats obtenus.....	23
2.	Remarques.....	25
3.	Bilan.....	25
B.	Agriculture de précision .....	25
1.	Outils d'aide à la décision .....	26
a.	Résultats obtenus.....	27
b.	Remarques.....	29
c.	Bilan .....	30
2.	Application de doses d'intrants ajustées et localisées .....	30
a.	Résultats obtenus.....	31
i.	Ajustements des traitements phytosanitaires .....	31
ii.	Fertilisation de précision .....	32
iii.	Irrigation à taux variable.....	33
b.	Remarques.....	34
d.	Bilan .....	36
3.	Agriculture robotisée .....	36
a.	Résultats obtenus.....	37
b.	Remarques.....	38
c.	Bilan .....	38
III.	Substitution des intrants .....	38
A.	Pesticides .....	38

1.	Lutte physique .....	38
a.	Désherbage mécanique .....	38
iv.	Résultats obtenus .....	39
v.	Remarques .....	41
vi.	Bilan .....	41
b.	Désherbage mécanique robotisé .....	42
i.	Résultats obtenus .....	42
ii.	Remarques .....	43
iii.	Bilan .....	44
2.	Biocontrôle .....	44
a.	Lutte biologique .....	44
i.	Résultats obtenus .....	45
ii.	Remarques .....	46
iii.	Bilan .....	47
b.	Lutte biotechnique .....	47
i.	Confusion sexuelle .....	47
ii.	Stimulateurs de Défenses Naturelles.....	49
c.	Efficacité du biocontrôle.....	50
B.	Engrais.....	51
1.	Engrais organiques .....	51
a.	Résultats obtenus.....	51
b.	Bilan .....	52
2.	Engrais verts .....	53
a.	Résultats obtenus.....	53
b.	Remarques.....	55
c.	Bilan .....	55

IV.	Résultats.....	56
A.	Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation des intrants .....	56
1.	Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation des pesticides .....	56
2.	Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation d'engrais. ....	58
3.	Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation de l'eau.....	59
B.	Effets des pratiques sur les conditions socioéconomiques.....	60
C.	Effets des pratiques sur les performances environnementales et climatiques.....	63
V.	Discussion.....	66
A.	Les pratiques intéressantes à promouvoir au niveau européen .....	66
B.	Les limites et perspectives .....	67
	Bibliographie.....	68
	Table des tableaux .....	78
	Table des figures .....	79
	Liste des sigles et acronymes .....	80

## 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 viticole européen qui embauche plus de 2,5 millions de personnes et qui occupe 5,6% des surfaces agricoles européennes, en particulier dans des zones où peu d'autres économies peuvent se développer.

Non seulement elles sont de nature à mettre en cause la place de l'Europe sur le marché mondial, mais elles auraient un impact notable sur les conditions de vie des exploitations viticoles et l'économie de ces régions.

Un scénario de restructuration du secteur viticole, de réduction du nombre d'exploitations et d'abandon de terres du fait de décisions politiciennes n'est pas envisageable, d'autant plus qu'il n'y a pas de réelle alternative agricole pour la majorité des terres viticoles.

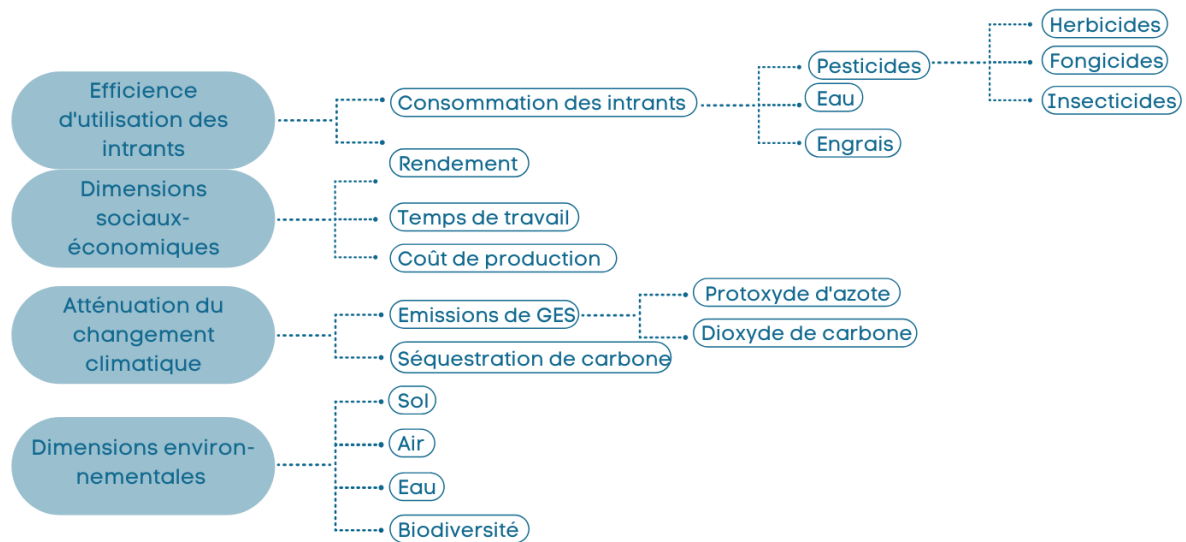
Ces constats montrent la nécessité de définir une autre voie pour répondre aux principes du Pacte Vert européen et d'une transition écologique responsable et efficace des secteurs agricoles dont la viticulture européenne.

Ce rapport analyse un ensemble de pratiques activables pour atteindre les objectifs européens tout en confortant les capacités de production, les finances des viticulteurs et leur temps de travail.

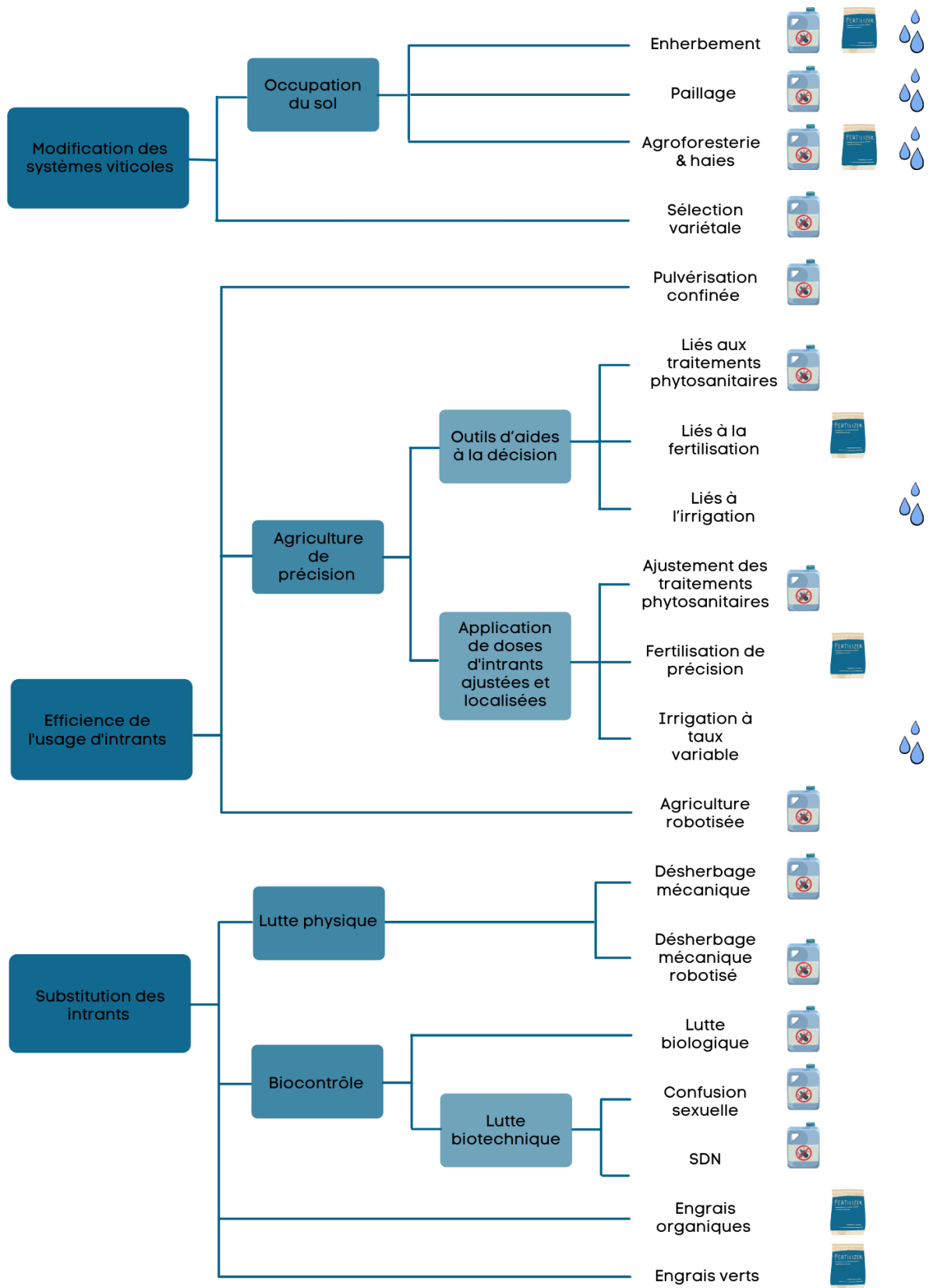


De nombreux travaux européens ont évalué et quantifié l'effet de diverses pratiques à l'échelle de l'exploitation ou de la parcelle. Cette étude s'est attachée, à partir d'une revue de ces travaux, à obtenir des ordres de grandeur de l'effet des différentes pratiques pour en dégager celles ayant les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

Les différents éléments comparés sont données ci-dessous :



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

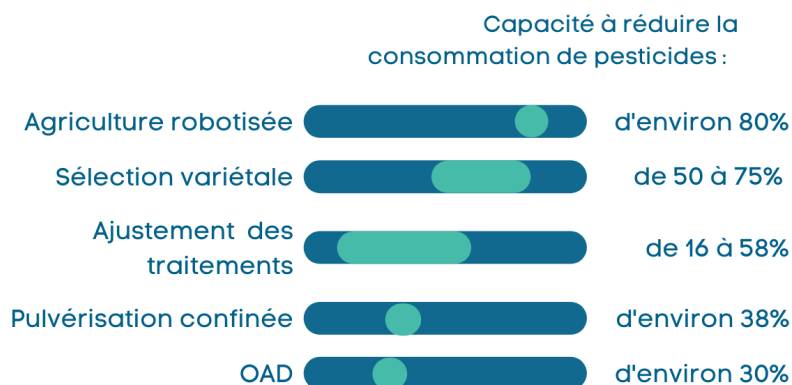


## Les résultats qui en émanent peuvent être résumés comme suit :

Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation des pesticides

Les ordres de grandeurs concernant les pratiques retenues pour leur effets bénéfiques sur la gestion des pesticides sont les suivants :

L'utilisation de pratiques ayant des effets bénéfiques sur la gestion des pesticides peut donner les résultats suivants :



Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation d'engrais

L'utilisation d'OAD et la fertilisation de précision semblent les plus intéressantes à promouvoir. Si la majorité des pratiques influence la qualité des mous, l'enherbement, la vitiforesterie ou les engrais verts peuvent induire une baisse quantitative du rendement. La différence de type d'engrais (de synthèse, organique) n'a pas d'impact sur l'efficacité de leur utilisation.

Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation de l'eau

Les pratiques comme l'enherbement, les paillages organiques et de synthèse et la vitiforesterie concernent l'efficacité de l'utilisation de l'eau disponible dans le sol et ont des effets constatés selon les contextes pédoclimatiques. Elles se distinguent des pratiques liées à la stratégie d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation qui regroupent les OAD, l'irrigation à taux variable et la fertigation. Ces dernières semblent maintenir ou augmenter les rendements.

Effets des pratiques sur les conditions socioéconomiques

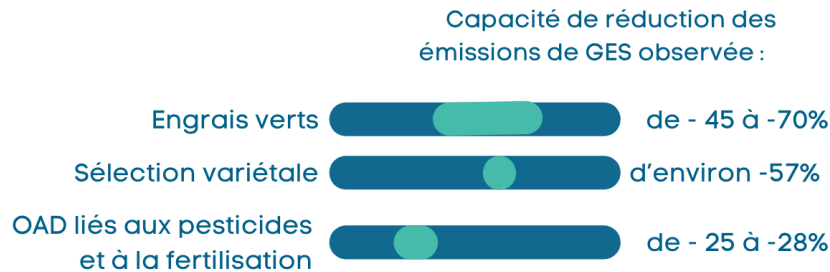
La sélection variétale et l'utilisation d'engrais organiques sont les pratiques ayant un impact positif sur le rendement, le temps de travail et le coût de production.

Les OAD, l'ajustement des traitements phytosanitaires, la fertilisation de précision et l'irrigation à taux variable peuvent induire une légère augmentation du temps de travail lors de la prise en main de l'outil, mais peuvent générer des retours positifs en matière de rentabilité économique. L'enherbement spontané semble être une autre pratique intéressante du point de vue socioéconomique, tout comme le désherbage mécanique robotisé dont l'investissement est inférieur à 40 000€.

La robotisation de la viticulture semble une technique prometteuse face au temps de travail, mais elle n'apparaît pas rentable aujourd'hui et est toujours en phase expérimentale.

## Effets des pratiques sur les performances environnementales et climatiques

Parmi les pratiques étudiées, seules l'enherbement et l'agroforesterie ont un effet sur la séquestration de carbone. Les pratiques qui ont une action favorable sur les différentes composantes environnementales et dont la capacité à réduire les émissions de GES semble intéressante sont :



Aucune pratique n'est une solution clef car elles ont toutes des avantages et des inconvénients. **Néanmoins, les plus intéressantes à promouvoir, quel que soit l'intrant semblent être l'utilisation d'OAD, la pulvérisation confinée et la sélection variétale.**

L'enherbement, les engrais verts, le désherbage mécanique mixte et les méthodes de biocontrôle peuvent compromettre une des dimensions sociaux-économiques. Elles restent néanmoins des pistes intéressantes dans des vignobles de petite taille ou à faible objectif de rendement.

La viticulture de précision et la robotisation sont des solutions d'avenir. Pour bénéficier pleinement de ces technologies et des OAD, des formations, un accompagnement et une analyse du sol sont nécessaires.

Enfin, l'efficacité de certaines pratiques n'a lieu que si les quantités d'intrants sont adaptés à la pression sanitaire et aux besoins hydriques et azotés.

Ces conclusions sont parfois partielles, notamment au niveau de la séquestration de carbone. Les effets des pratiques sont en réalité issus de l'interaction de l'ensemble des pratiques réalisées sur la parcelle et en fonction de ses conditions pédoclimatiques. Elles ne sont pas toutes généralisables à l'échelle européenne. C'est pourquoi, il semble nécessaire de confronter ces résultats avec les retours des viticulteurs issus de différentes régions européennes et de différents types d'exploitation.

## Contexte

### I. Production viticole européenne

#### A. Surface et zones géographiques

Les surfaces viticoles occupent 3,2 millions d'ha en 2015 en Europe. Cela correspond à 5,6% des surfaces agricoles européennes et à 45% des surfaces viticoles mondiales (European Commission 2017). Comme le montre la Figure 1, l'essentiel de la production viticole se situe sur des terres relativement pauvres autour de la méditerranée : 29% de ces surfaces se situent en Espagne, 24% sont en France et 20% en Italie.

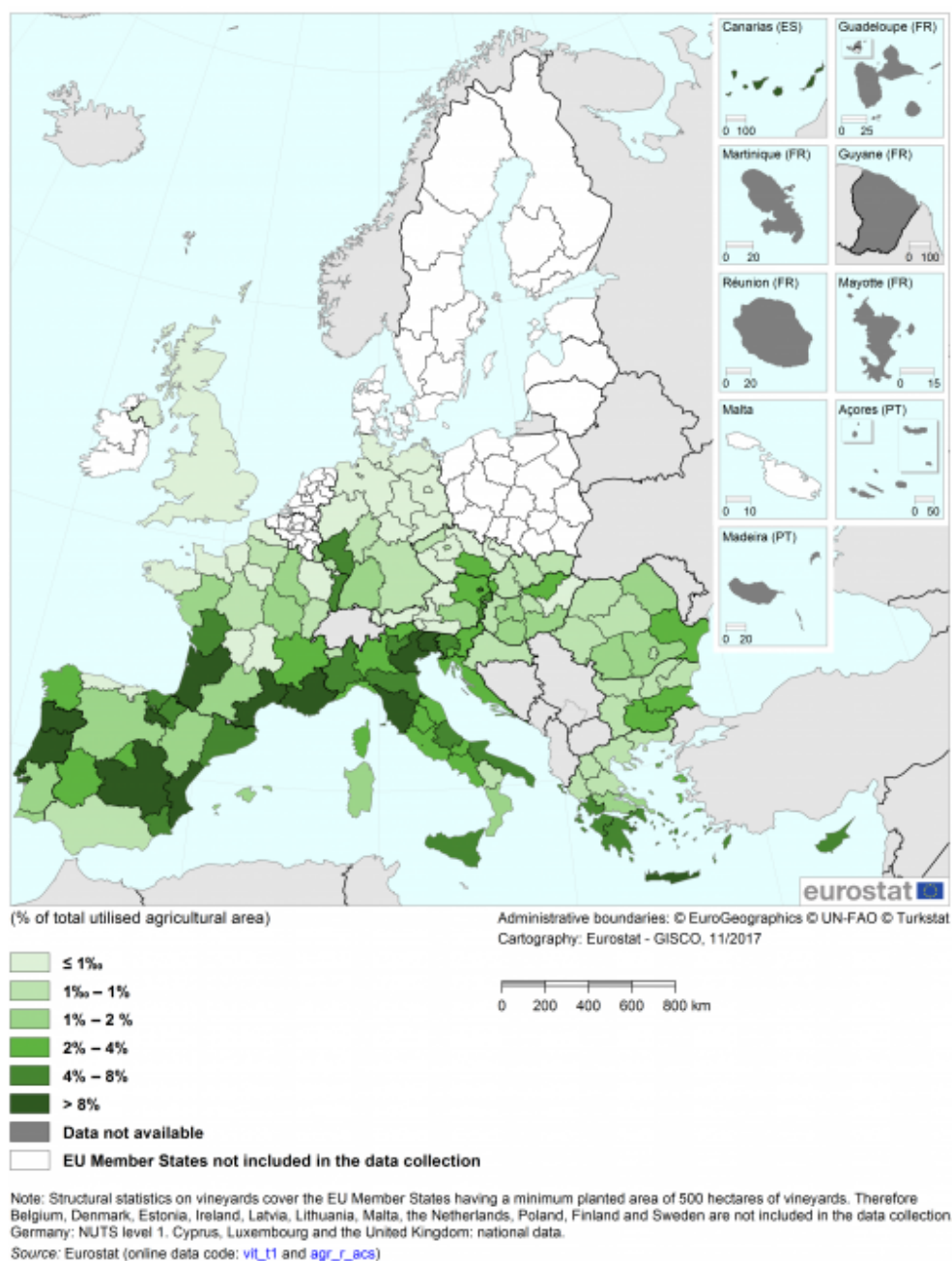


Figure 1 - Surfaces viticoles européennes en 2015 (% de la surface agricole utile totale), source : Eurostat (vit\_t1)

## B. Production

Plus d'un tiers des 2,5 millions de vignerons européens sont en Roumanie. Cela représente 0,9 millions d'exploitations. L'Espagne compte 500 000 exploitations viticoles et l'Italie 400 000 exploitations. Cela correspond respectivement à 20% et 15% des exploitations viticoles européennes.

De grandes disparités dans la taille des exploitations existe. La taille moyenne des exploitations viticoles est de 1,3 ha. C'est en Roumanie que se situent les plus petites et en France que se situent les grandes exploitations viticoles. La taille moyenne des exploitations roumaines et françaises sont respectivement de 0,21 ha et de 10,5 ha (European Commission 2017).

Plus de la moitié de la production est sous Appellation d'Origine Contrôlée, soit 65%, 17% est sous Indication Géographique Protégée et 13% est considéré comme du vin de table (European Commission 2017).

La production européenne était en 2020 de 165 Mhl, avec des productions essentiellement réalisées en Italie (49 Mhl), en France (47 Mhl) et en Espagne (42 Mhl). L'Europe est le premier producteur et exportateur mondial, sa production correspondant à 63% de la production mondiale (OIV 2020).

## C. Les principaux intrants

Le secteur viticole consomme des quantités substantielles de pesticides par rapport à la surface agricole qu'il occupe (Pinto 2017). Peu de données sont disponibles à l'échelle européenne ou pour les autres pays.

Les pesticides les plus utilisés sont les fongicides. Ils correspondent à 83% de l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement)<sup>1</sup> total des pesticides utilisés en viticulture. Cela représente un IFT de 12,7, soit 16 traitements sur 21 en moyenne en 2016. Les insecticides correspondent à 13% de l'IFT total en viticulture, ce qui représente environ 1,9 IFT en moyenne. Les herbicides correspondent à 5% de l'IFT total en viticulture et correspondent à 0,7 IFT en moyenne. Ces chiffres sont donnés à titre indicatif, ils varient selon les années, les conditions climatiques et sanitaire, les régions et selon le choix des pratiques mises en œuvre dans les vignobles (Simonovici 2019).

### Consommation d'azote

Les raisins exportent 30 à 50% des éléments nutritifs absorbés par les vignes (Rousseau et al., n.d.). L'azote est l'élément auquel la vigne est le plus sensible. Un excès d'azote provoque une vigueur exacerbée, ce qui se traduit par un rendement trop important et une baisse de la qualité des baies. A l'inverse, une carence réduit les rendements et la fermentescibilité des moûts, ce qui se répercute également sur la qualité des vins (Comifer 2012a).

---

<sup>1</sup> Il s'agit du rapport entre la dose appliquée et la dose de référence multipliée par la surface traitée.

Les besoins de la vigne sont modestes. Ils se situent en moyenne autour de 20-60 kg d'azote par hectare et par an pour des rendements allant de 6 à 10 t/ha et autour de 60 à 90 kg/ha pour des rendements allant de 10 à 25 t/ha (Gontier and Cahurel 2021; Comifer 2012a). La gestion de l'azote est raisonnée en priorité par la minéralisation des MO (matières organiques) du sol, qui est dépendante des conditions climatiques, de la température de l'humidité, du type de sol et de son pH. Si cette dernière ne suffit pas et que des carences sont diagnostiquées, l'apport d'autres formes azotées peut alors être envisagée (Gontier and Cahurel 2021).

#### Consommation d'eau

L'irrigation est de plus en plus développée dans les vignobles du pourtour méditerranéen afin d'atténuer les risques climatiques et de garantir le rendement et la qualité des baies. Plus de 40% des surfaces viticoles espagnoles sont aujourd'hui irriguées et 10 à 15% des surfaces le sont au Portugal. Ces surfaces tendent à accroître bien que des restrictions sur l'utilisation de l'eau soient imposées par des législations régionales (Costa et al. 2020).

#### Les 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 ("Pratiquer l'enherbement Total En Vigne," n.d.).

## **II. Le secteur viticole face aux enjeux climatiques**

La viticulture est tributaire de la météo. Elle 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. Ces changements ont un effet direct sur les rendements et sur les qualités organoleptiques des vins européens, qui sont à l'origine de leur renommée internationale.

Peu d'informations sur la part des émissions de GES (gaz à effet de serre) relative au secteur viticole européen sont disponibles. Néanmoins des études d'analyse de cycle de vie sur la production de vin ont été réalisées. Il en ressort que la vinification et la commercialisation sont beaucoup plus émettrices que la phase de viticulture qui émet entre 1/5 et 1/4 des émissions totales.

La viticulture émet entre 413 et 525 kg d'eCO<sub>2</sub> (équivalent dioxyde de carbone) par tonne de raisins. Les émissions relatives à la combustion de diesel liée aux tracteurs agricoles et au transport des ouvriers correspondent à près de la moitié des émissions réalisées. Elles sont comprises entre 0,167 et 0,33 kg eCO<sub>2</sub> par bouteille de vin produite selon une étude portant sur sept vignobles français et espagnols. Les émissions relatives à la production des traitements phytosanitaires suivent, mais sont très variables selon les exploitations pouvant être de 2 à 30%. Elles sont comprises entre 0,017 et 0,355 kg eCO<sub>2</sub> par bouteille de vin produite selon cette même étude. Les émissions de N<sub>2</sub>O (protoxyde d'azote) et celles relatives à la fabrication d'engrais et de diesel sont inférieures à 10%. Elles sont toutes comprises entre 0 et 0,05 kg eCO<sub>2</sub> par bouteille de vin produite (KERNER, n.d.; Navarro et al. 2017).

Pour lutter contre les effets du changement climatique, la viticulture, comme tous les autres secteurs, doit tendre à réduire ses émissions de GES. Mais elle a également, au même titre que l'agriculture, la capacité de stocker du carbone dans ses sols.

### III. Le secteur viticole 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, de par les pratiques mises en place, de services écosystémiques. Mais elle peut aussi recevoir et émettre des impacts négatifs sur ces composantes. Il s'agit notamment de la pollution des écosystèmes de par les intrants impliqués, de la pression sur la ressource en eau qui est particulièrement vulnérable dans les régions méditerranéennes, la dégradation de la fertilité des sols et de la perte de biodiversité.

Le constat est applicable à l'ensemble du secteur agricole. Couplé aux externalités négatives sur la santé, ainsi qu'au rôle de gestionnaire de 38% de la surface européenne des agriculteurs, il a poussé à la mise en œuvre d'actions environnementales (exigences, incitations, rémunérations...) en direction de l'agriculture.

### IV. 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<sup>2</sup> 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 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.

---

<sup>2</sup> « Situation dans laquelle les émissions anthropiques de GES dans l'atmosphère sont compensées par les éliminations anthropiques au cours d'une période donnée » (Matthews 2018).



## V. Le secteur viticole face aux enjeux économiques

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

Ces orientations alarmantes, s'additionnent aux enjeux climatiques et environnementaux auxquels doit faire face le secteur viticole européen. Au-delà de la place du secteur viticole européen sur le marché mondiale où la concurrence est déjà rude, elles remettent en cause les conditions de vie des exploitants et l'économie des régions viticoles. L'idée d'une restructuration du secteur viticole, d'une réduction du nombre d'exploitations et d'abandon de terres n'est pas envisageable, d'autant plus qu'il n'y a pas de réelle alternative agricole pour la majorité des terres en vignobles.

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 viticulteurs de bonnes conditions de travail et une juste rémunération permettraient d'atteindre les objectifs européens tout en protégeant les capacités de production des viticulteurs.

De nombreux travaux ont évalué et quantifié l'effet de diverses pratiques dans les exploitations agricoles. Cette étude a pour but d'en sélectionner 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

Ce rapport se base sur une revue bibliographique d'études, de méta-analyses, d'articles et de fiches pratiques traitant des différentes pratiques viticoles. La majorité de ces documents sont des retours de vignerons, d'instituts et de centres de recherche européens.

Les pratiques étudiées se répartissent en trois catégories selon le concept ESR (Efficience – Substitution – Re-conception) (Gayraud and Delva 2015). Elles sont données en Figure 2 avec les intrants dont elles affectent l'usage.

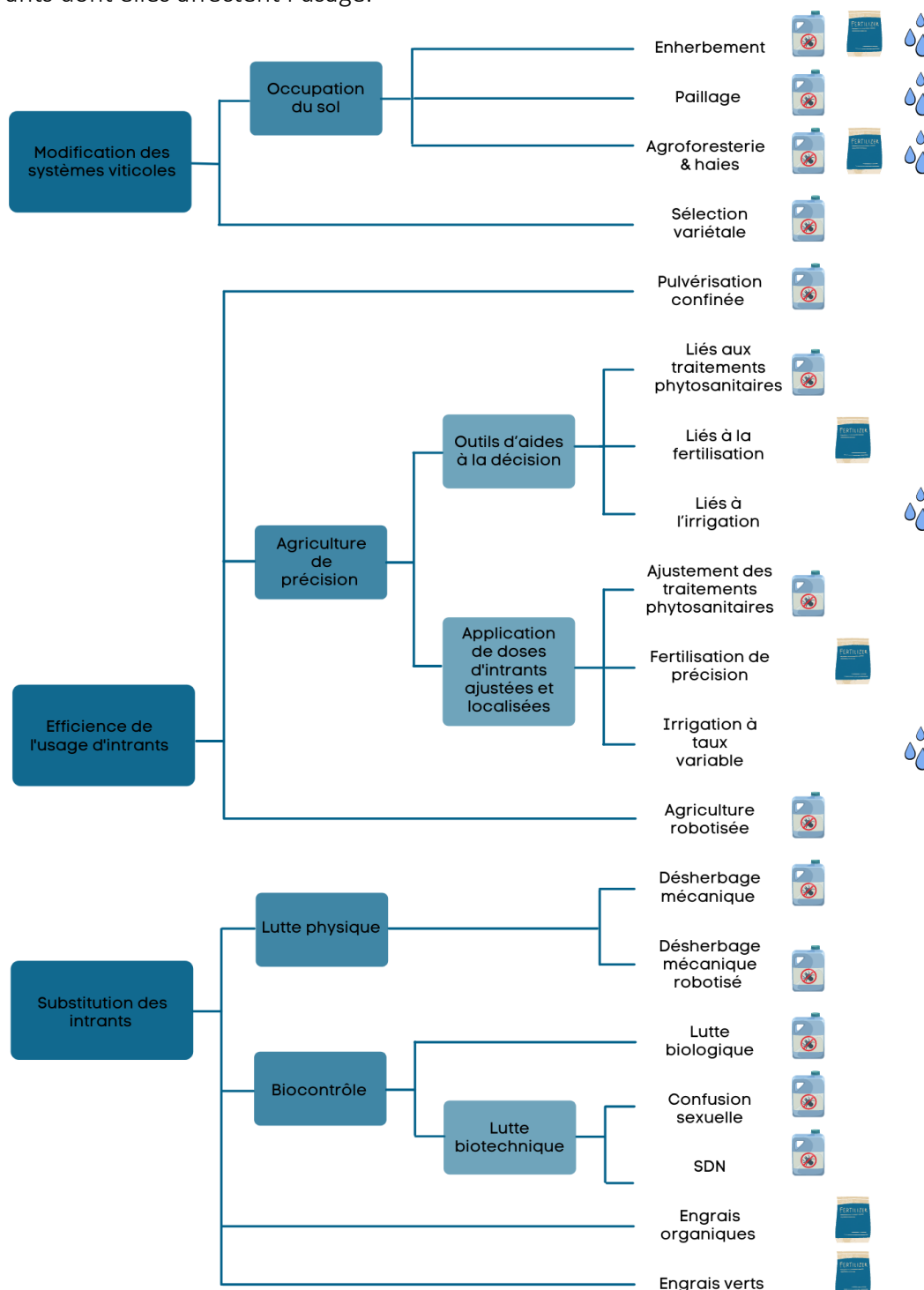


Figure 2 – Les pratiques étudiées et les intrants dont elles affectent l'usage

Ces pratiques sont transversales à tous les systèmes de production. D'autres pratiques existent mais n'ont pas été prises en considération. La conduite des vignes (écartement des rangs de vignes, choix du type de taille, orientation...), par exemple, n'a pas été étudiée bien qu'elle permette une réduction de la consommation d'eau car trop de facteurs rentrent en considération.

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

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

#### L'effet de la pratique sur des dimensions socio-économiques a été analysée 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 la pratique 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.

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

- Des émissions directes de N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub> et, lorsque des données étaient disponibles, les émissions indirectes de CO<sub>2</sub>.
- 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 NH<sub>3</sub> (ammoniac).
- La qualité du sol, qui correspond à :
  - o Sa fertilité chimique : production/dégradation des MO.
  - o Sa fertilité biologique : biodiversité des micro-organismes assurant l'activité biologique du sol.
  - o Sa fertilité physique : perméabilité, résistance à la compaction, au tassement, à l'érosion et à la lixiviation.
- L'eau :
  - o Rétention d'eau dans le sol, lutte contre le ruissellement.
  - o Qualité de l'eau : filtration et dégradation des pesticides. Lutte contre le transfert de pesticides, contre la lixiviation et l'eutrophisation.
  - o La préservation de la biodiversité macro et microscopique, de la faune et de la flore.

## Le modèle de références et les données transversales

Toutes ces pratiques sont comparées à un système « de référence » désherbé de façon chimique. Les pesticides (herbicides, fongicides et insecticides) comptent pour environ 490€/ha. La protection phytosanitaire demande entre 8 et 10 h/ha . Le coût de la fertilisation est de 190€/ha et nécessite entre 3 et 5h/ha. Les autres pratiques liées à la taille et à l'entretien des plantations ( ébourgeonnage, attachage, pallissage *etc.*) ne sont pas prises en considération (Badier et al. 2019).

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 3.7 kg de eCO<sub>2</sub> et que 1% de l'azote appliqué est émis en N<sub>2</sub>O. Ces informations permettent de compléter les informations relatives au coût de production ou aux émissions de GES grâce à celles 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 très réducteur. Il s'agit ici d'obtenir des ordres de grandeur de l'effet des différentes pratiques pour en dégager celles ayant le plus d'impacts.

## Résultats

### I. Modification des systèmes viticoles

#### A. Occupation du sol

##### 1. Enherbement

L'enherbement des parcelles viticoles est largement connu en Europe. Près de 50% des vignobles l'étaient en France en 2010 (Garcia et al. 2018). Ces couverts de légumineuses, de graminées, de crucifères, d'hydrophyllacées peuvent être spontanés ou semés (Gontier and Delpuech 2019; Frey 2016). Ce peut être des couverts hivernaux, implantés après les vendanges, jusqu'au débourrement ou des couverts semi-permanents s'ils sont maintenus jusqu'à la vendange suivante. Ils sont dits permanents si l'enherbement n'est pas détruit entre deux vendanges (Frey 2016).

Parmi les différents agencements existants, les types d'enherbement les plus communs sont l'enherbement de l'inter-rang, couvrant 50 à 60% de la surface du sol et l'enherbement sous le rang, couvrant 25 à 30% de la surface du sol. L'enherbement total est peu pratiqué pour limiter le risque de faire chuter le rendement de 20 à 50% (Gontier and Delpuech 2019). Il n'est pas pris en considération dans cette partie.

Les semis sur l'inter-rang peuvent être réalisés à la volée, avec un semoir direct, ou par plantation dans certains cas (Frey 2016). Les semis sous le rang peuvent être réalisés avec des épandeurs à engrais localisés, car peu de matériel spécifique est à disposition aujourd'hui (Gontier and Delpuech 2019). L'entretien du couvert se fait par tonte, fauche, broyage, pâturage, ou roulage. La destruction des couverts peut avoir lieu par action mécanique (labour, ameublissement, griffage ou binage), par action chimique ou par action thermique. Cette partie se concentre sur l'enherbement en tant que tel. Sa destruction mécanique est détaillée page 38 et sa destruction chimique par des robots page 36.

#### a. Résultats obtenus

### Effets sur l'utilisation des intrants

#### Pesticides

##### Gestion des adventices

Le premier but recherché par l'enherbement est de lutter contre les adventices (Varray and Le Roux 2012). Il permet de limiter le désherbage aux rangs de vignes, ce qui réduit les quantités d'herbicides utilisées à l'hectare par deux ou trois (Benoit 2010). Or les herbicides ne représentent généralement que 5% des traitements phytosanitaires, rendant l'effet de l'enherbement sur les pesticides très faible.

## Gestion des maladies

L'enherbement n'a pas d'effet direct sur les maladies. Des effets indirects observés sur l'oïdium, la pourriture grise ou le mildiou sont liés à une diminution de la vigueur de la vigne, causée par la concurrence du couvert pour les ressources en eau et en nutriments (INRAE 2021). L'enherbement peut également augmenter l'activité biologique du sol, entraînant une décomposition plus rapide des résidus, sources d'inoculum. D'autres, au contraire, estiment que l'enherbement maintient une humidité élevée à proximité des vignes. Cette humidité associée à la hausse des températures, au printemps, favoriserait le risque de développement de maladies fongiques (Garcia et al. 2018).

## Gestion des ravageurs

L'effet de l'enherbement sur les ravageurs n'est pas clairement attesté. Certains auteurs affirment que l'enherbement des inter-rangs et du cavaillon augmente la présence de ravageurs alors que d'autres observent leur réduction (Garcia et al. 2018). A titre d'exemple, selon une étude menée dans le beaujolais entre 2004 et 2012 la présence d'une bande enherbée tous les cinq rangs permet de réduire le recours aux insecticides (Varray and Le Roux 2012).

## Eau

L'enherbement favorise le stockage d'eau dans le sol en hiver mais peut entrer en concurrence avec les vignes à partir du printemps (Froger 2020). Une contrainte hydrique en début de cycle ou de débourrement peut entraîner une diminution de la croissance végétative, ce qui peut être bénéfique pour des vignes vigoureuses et précoces. Si elle a lieu entre la floraison et la véraison, elle peut induire une baisse de rendement.

L'influence de l'enherbement sur les rendements des vignes varie selon le climat, le type de sol, le type d'herbe et le type de cépage. Dans les climats plus pluvieux, l'enherbement est nettement moins concurrentiel pour l'eau. Un stress hydrique entraîne une réduction de l'assimilation d'azote. La concurrence de l'enherbement pour l'azote sera donc plus élevée dans le pourtour de la méditerranée que dans les régions plus humides ("Pratiquer l'enherbement Total En Vigne," n.d.).

## Engrais

L'effet de l'enherbement sur la disponibilité en azote pour la vigne est discuté selon le type d'enherbement. Les couverts à base de légumineuses peuvent assurer des apports azotés. Leurs effets sont détaillés dans la partie sur les engrais verts, page 53. Un risque de compétition pour ces nutriments peut avoir lieu pour les enherbements autres que des bandes fleuries et ou des engrais verts ("L'enherbement de La Vigne En 10 Questions Réponses" 2020). Il peut être évité par une tonte régulière.

La mise en place d'enherbement nécessite l'application d'environ 30 kg d'N/ha, ce qui est relativement faible, pour initialiser la pousse du couvert herbacé (Comifer 2012a).

## Effets sur le rendement

Les surfaces enherbées entrent en compétition avec la vigne pour les ressources en eau et en nutriments. Cela impacte le rendement qui peut diminuer de 9% en moyenne par rapport à une gestion chimique. Cette diminution reste variable. Très marquée la seconde année, elle tend à diminuer les années suivantes. Une solution pour limiter cette concurrence est de réduire la surface de l'enherbement ("L'enherbement de La Vigne En 10 Questions Réponses" 2020).

Si l'enherbement risque de réduire les rendements, il maintient voire augmente la qualité de certains vins (Gontier and Delpuech 2019).

## Effets sur le temps de travail

Les techniques d'enherbement demandent trois fois plus de travail qu'une gestion chimique. Deux à cinq interventions annuelles demandant de long temps de travaux ont lieu, selon l'agencement choisi et le matériel utilisé. Selon d'autres sources, la réalisation de bandes enherbées dans les inter-rangs en viticulture nécessite au total 1h pour enherber un rang tous les huit rangs sur une parcelle de 0.4 ha (Varray and Le Roux 2012).

## Effets sur le coût de production

En tenant compte du coût des produits, de la main d'œuvre et de la traction, le coût de l'enherbement varie de 800 à 1 000 €/ha/an et celui d'une gestion chimique s'élève à 100-140 €/ha/an selon Christophe Gaviglio (2018). Si l'enherbement est spontané, il permettrait une économie de 15 à 26 €/ha/an (INRA 2019). Le temps passé à l'hectare est le premier facteur influant le coût de production. Les viticulteurs qui acceptent que l'herbe se développe à un niveau raisonnable réduisent le nombre de tontes et ont un coût à l'hectare proche du désherbage chimique, mais cela risque d'impacter le rendement (Delpuech 2014).

## Effets sur l'atténuation du changement climatique

L'enherbement de la vigne permet de stocker entre 0,18 à 1,76 tonne de carbone par ha et par an (INRA 2019). Cette pratique émet environ 1 tonne de CO<sub>2</sub>e par an et par hectare (Chenu et al. 2014).

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

L'enherbement favorise l'activité biologique des sols, maintient la biodiversité et produit de la matière organique. L'enherbement des inter-rangs structure le sol, renforçant la résistance à la compaction et restaure les sols compactés. La stabilité et la portance du sol sont également maintenues. La porosité des sols est augmentée, favorisant ainsi la rétention d'eau dans le sol. Le ruissellement, l'érosion et le transfert de pesticides par la pluie et dans les nappes phréatiques sont réduits ("L'enherbement de La Vigne En 10 Questions Réponses" 2020; Garcia et al. 2018).

## b. Remarques

L'impact des bandes enherbées sur les ravageurs et leur efficacité dans la lutte biologique dépend de leur type et de leur proportion (Jeanneret et al. 2017). Leur capacité d'infiltration et d'atténuation 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).

L'enherbement peut diminuer le rendement, ce qui est d'ailleurs la principale crainte des viticulteurs vis-à-vis de cette pratique. Cette pratique convient à des systèmes de production ayant des objectifs de production modérés, comme en Appellation d'Origine Protégée (AOP), où les rendements à atteindre sont faibles (Gaviglio 2018a). Un désherbage régulier limite la concurrence du couvert sur l'eau et l'azote, réduisant ainsi les conséquences sur le rendement. Le désherbage robotisé permettrait d'atteindre un rendement correct sans augmenter la charge de travail.

## c. Bilan

L'enherbement augmente le coût de production de par l'augmentation du temps de travail. Les espèces implantées peuvent entrer en concurrence avec les vignes pour les ressources en eau et en azote. Si les rendements peuvent être impactés, la qualité de certains vins peut, à l'inverse, être améliorée. Il s'agit d'une pratique recommandée pour les vignes vigoureuses et précoces pour améliorer la qualité de la récolte.

Les herbicides peuvent être réduits, mais ils ne présentent qu'une petite portion de l'ensemble des traitements phytosanitaires. Si la gestion du couvert est techniquement réalisable, le choix des espèces à implanter et du type d'agencement est stratégique pour ne pas avoir de conséquences néfastes sur la marge brute. Cette pratique ne semble pas permettre une utilisation efficiente des intrants aujourd'hui. L'avènement de la robotisation, réduisant le temps de travail et assurant un meilleur contrôle du couvert, pourrait amener à revoir cette conclusion.

Si la quantité de carbone stockée par an est supérieure aux émissions de GES liées à leur gestion, l'enherbement paraît une solution intéressante pour atténuer le changement climatique. Cette pratique préserve la biodiversité, le sol et l'eau.

## 2. Paillage

En viticulture les paillages sont utilisés pour lutter contre les adventices. Ils sont des alternatives au désherbage chimique lorsqu'ils sont réalisés sous rang et au travail mécanique lorsqu'ils sont réalisés dans l'inter-rang. Ils ont également la propriété de maintenir le sol humide et frais, ce qui joue en faveur de l'eau disponible pour les vignes.



Un paillage organique de 5 cm d'épaisseur peut être réalisé dans les parcelles adultes à partir du broyage des adventices de la parcelle ou des parties émondées de la vigne. De la paille de céréales, des tiges de chanvres ou des écorces peuvent également être utilisées (Gontier and Gaviglio 2018; Manzone et al. 2020). L'implantation d'une nouvelle parcelle viticole peut être réalisée sur des bâches ou textiles couvrant les inter-ceps (Gaviglio and Delpuech 2019; Agrobiofilm Consortium 2013). Parmi ces paillis synthétiques, seules les bâches biodégradables sont considérées. Ces solutions d'origine organique ou synthétique sont aujourd'hui peu utilisées par les vignerons.

#### a. Résultats obtenus

##### Effets sur l'utilisation des intrants

###### Herbicides

Les paillis organiques ou réalisés à l'aide de bâches ont un effet limité dans le temps. Les paillis organiques se décomposent rapidement et sont efficaces sur les adventices seulement deux années suivant leur mise en place. Les premières dégradations des bâches sont généralement observées au bout de 4 à 5 mois en climat méditerranéen, notamment à cause des UV. Elles ont néanmoins une durée de vie de 2 à 4 ans (Gontier and Gaviglio 2018; Agrobiofilm Consortium 2013).

Le Tableau 1 montre que, durant cette période, leur efficacité contre les adventices est moyenne et variable selon les matières utilisées dans les paillis organiques.

*Tableau 1 - Pourcentage d'efficacité de différents paillages sur les adventices*

Paillage	Pourcentage d'efficacité	Source
Paille de céréales	25-30%	(Gontier and Gaviglio 2018)
Fibres de chanvre broyé	60-80%	(Gontier and Gaviglio 2018)
Écorces de châtaignier broyées	60-80%	(Gontier and Gaviglio 2018)
Broyage des adventices de l'inter-ceps	70%	(Manzone et al. 2020)

## Eau

Des essais réalisés dans des vignobles français ont relevé des teneurs en eaux supérieures dans les sols couverts avec un paillis organique par rapport au témoin. Les températures des sols couverts par les paillis étaient jusqu'à 5°C inférieures à celles du témoin. Ces différences varient selon les années, les climats, les saisons et les types de paillis (Gontier and Gaviglio 2018).

D'après une étude espagnole, un paillage organique réduit davantage l'évapotranspiration des vignes par rapport à un paillage de synthèse, mais il accentue la transpiration des vignes. D'après leurs résultats, un paillage organique réduit la consommation d'eau de 37% par rapport à un mulch plastique (López-Urrea et al. 2020).

Une plus grande croissance des racines des vignes a été observée sous paillage plastique par rapport au témoin entraînant une meilleure assimilation de l'eau. Cette affirmation réalisée pour les paillages plastiques n'a pas été vérifiée pour les paillages organiques.

## Effets sur le rendement

Une baisse de 20 à 25% du rendement est notée pour les paillages organiques lors d'un essai de 2010 à 2012. La raison de cette baisse de rendement n'a pas été clairement identifiée. Ainsi, la corrélation entre la baisse du rendement et la mise en place d'un paillis organique n'est pas évidente (Gontier and Gaviglio 2018).

Les vignes sont plus vigoureuses les trois premières années suivant leur plantation lorsqu'une bâche recouvre les inter-ceps par rapport à un sol nu. Les premiers rendements sont multipliés par 11 (4,24kg/cep) par rapport aux rendements obtenus sur un sol nu (0,39 kg/cep) en conditions extrêmement sèches. Ils peuvent être réduits de 30% dans des conditions plus clémentes (Agrobiofilm Consortium 2013).

## Effets sur le temps de travail

La mise en place d'un paillage fait varier le temps de travail entre - 20% et + 17% par rapport à un désherbage chimique, comme le montre le Tableau 2. Cette variation est due au type de paillis et aux outils à disposition. Après la mise en place, une simplification du travail a lieu, notamment pour les productions biologiques (Gontier and Gaviglio 2018).

Tableau 2 - Temps de travail par hectare selon différents paillages ou en désherbage chimique

Type de paillage	Temps de travail (h/ha)	Source
Paille de céréales	2	(Gontier and Gaviglio 2018)
Broyage des adventices de l'inter-ceps avec un broyeur à sarments	2,92	(Manzone et al. 2020)
Désherbage chimique	2,48	(Manzone et al. 2020)

## Effets sur le coût de production

Le coût de la mise en place d'un paillage organique ou d'une bâche est deux à six fois plus élevée qu'un désherbage mécanique qui coûte environ 320€/ha/an selon les références de l'IFV. Une estimation des coûts est donnée Tableau 3. L'apport de matière organique ou l'achat de bâches représentent la majeure partie de l'investissement. Les charges de main d'œuvre et de mécanisation ne correspondent qu'à environ 60€/ha. Le renouvellement bisannuel du paillis engendre un coût qui se confronte aux économies de carburant et d'herbicides réalisées par rapport à un désherbage chimique (Gontier and Gaviglio 2018).

Tableau 3- Coût estimé de différents types de paillage

Type de paillage	Coût estimé	Source
Organique	730 à 1830/ha/an lorsque c'est amorti sur 3 ans	(Gontier and Gaviglio 2018)
Bâche biodégradable	Trois fois plus élevé	(Gontier and Gaviglio 2018)
Broyage des adventices de l'inter-ceps	+7% par rapport à un désherbage chimique	(Manzone et al. 2020)

La marge obtenue avec un paillage a de fortes chances d'être inférieure à celle obtenue avec un désherbage chimique (Gontier and Gaviglio 2018). Le coût engendré par la mise en place de plastiques biodégradables serait compensé par les meilleurs rendements qu'ils permettent, d'après les études réalisées par Agrobiofilm Consortium (2013).

## Effets sur l'atténuation du changement climatique

Une réduction de 3% des émissions de CO<sub>2</sub> a été relevée lors de la mise en place de paillis organiques, grâce à une moindre consommation d'herbicides et de carburant (Gontier and Gaviglio 2018; Manzone et al. 2020).

L'analyse du cycle de vie (ACV) des paillis plastiques biodégradables estime que les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie non renouvelable doublent lors de l'utilisation de bâches plastiques biodégradables par rapport à un sol nu (Agrobiofilm Consortium 2013). Les données sont détaillées dans le Tableau 4.

Tableau 4 - Consommation d'énergie non renouvelable et émissions de CO<sub>2</sub> lors d'une gestion de l'inter-ceps avec une bâche biodégradable ou par un travail du sol nu, source : Agrobiofilm Consortium 2013

	Utilisation d'énergie non renouvelable (GJ /ha)	Émissions de CO <sub>2</sub> (T eCO <sub>2</sub> /ha)
Bâche biodégradable	30	1,4
Sol nu	15	0,7

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

Ces paillis organiques ou de synthèse assurent une protection du sol contre l'érosion, la compaction, la lixiviation et les risques d'eutrophisation. Ils assurent la disponibilité en azote et en eau pour les ceps et créent des conditions propices au bon fonctionnement biologique du sol et à la dégradation de la matière organique. Néanmoins, un paillis de paille de céréales peut entraîner la formation de croûtes dès la première pluie (Gontier and Gaviglio 2018; Manzone et al. 2020). L'humidité du sol est maintenue, limitant l'évapotranspiration. Certaines expérimentations relatent une baisse d'environ deux degrés Celsius au pied des ceps recouverts par des paillis par rapport à l'air ambiant (Gontier and Gaviglio 2018; Agrobiofilm Consortium 2013). La réduction d'herbicide induite améliore la qualité de l'air et limite les risques de transferts vers l'eau (Gontier and Gaviglio 2018).

### b. Bilan

Il s'agit d'une pratique facile à mettre en place lors de l'implantation de vignes, mais qui est bien plus complexe à mettre en œuvre sur des vignes déjà présentes (Gontier and Gaviglio 2018). Elle facilite l'entretien, maintient l'humidité au pied des vignes en périodes sèches mais n'assure qu'une gestion moyenne des adventices. Les coûts énergétiques sont réduits pour les paillis organiques mais augmentent à l'hectare lors de l'utilisation de plastiques biodégradables. L'investissement est important, quel que soit le type de paillis. Leur durée effective est bien trop courte pour être économiquement rentable. Cette pratique serait à combiner avec d'autres, peu coûteuses, comme l'enherbement des inter-rangs et/ou des inter-ceps (Gontier and Gaviglio 2018).

## 3. Agroforesterie et haies

L'introduction d'arbres fruitiers (amandiers, pêchers, figuiers, pommiers et oliviers) ou de bois d'œuvre (frêne, chêne, peuplier etc.) dans les parcelles viticoles suscite ces dernières années un regain d'intérêt. Ces systèmes longtemps cultivés dans le pourtour de la méditerranée de l'Espagne à la Grèce ont été délaissés par les dernières générations de viticulteurs au profit de la mécanisation (Trambouze and Goma-Fortin 2013; Lang et al. 2019). Aujourd'hui des instituts techniques et quelques vignobles étudient leur potentiel d'atténuation du changement climatique, de séquestration du carbone, de préservation de la biodiversité.

La plantation d'arbres dans un vignoble peut être réalisée de façon très diverse selon le choix des essences implantées, de leur position dans et autour des parcelles, de leur densité et entretien (Bourgade et al. 2020) ... Le choix du système de conduite de la vigne a également son importance, comme le témoignent certains agriculteurs qui ont réussi à réintroduire des arbres tout en maintenant le travail mécanique (Canet 2018).

Peu de références techniques et scientifiques documentent la vitiforesterie, et l'agroforesterie en viticulture. Cette partie détaille les résultats obtenus dans des projets menés dans le sud-ouest et le sud-est de la France, ainsi que dans l'est de l'Allemagne, dans des parcelles conventionnelles ou biologiques. Ces études portent sur l'introduction de rangées d'arbres tous les 4 à 40 rangs de vignes. Ces arbres âgés de 5 à 10 ans n'ont pas encore atteint leur maturité.

## c. Résultats obtenus

### Effets sur l'utilisation des intrants

#### Insecticides

Le principal intérêt de la réintroduction d'arbres dans les vignobles est de stimuler le phénomène de lutte biologique (Trambouze and Goma-Fortin 2013). Néanmoins des effets constatés pour la lutte contre les ravageurs ont été observés (Bourgade et al. 2020).

#### Eau

Une des principales craintes des viticulteurs est d'induire par la présence des arbres une concurrence hydrique. Aucune différence de contrainte hydrique significative n'a été observée dans différentes études, malgré des conditions parfois très sèches en été. Ces constats ont été faits pour des arbres n'ayant pas atteint leur taille maximale et seraient à vérifier sur des parcelles plus âgées (Trambouze and Goma-Fortin 2013; Bourgade et al. 2020).

#### Engrais

Comme pour la contrainte hydrique, les viticulteurs craignent que la présence d'arbres entre en concurrence avec la vigne pour l'azote. Les résultats diffèrent selon les études. Selon certaines, une telle concurrence existe car la teneur en azote assimilable diminue de 8 à 20 % (Trambouze and Goma-Fortin 2013). A l'inverse, une corrélation entre la présence d'arbres et l'augmentation du taux d'azote disponible et de son assimilation par les vignes est mise en avant par (Lang et al. 2019). Pour d'autres, la présence d'arbres de 8-9 ans ne semble pas influencer la vigueur des vignes, ni leur état azoté (Bourgade et al. 2020).

De nombreux facteurs comme les cépages, les essences d'arbres, leur âge, les systèmes de conduite des arbres et des vignes, le type de sol et le climat peuvent expliquer l'hétérogénéité des constats.

### Effets sur le rendement

L'interception lumineuse des arbres n'a pas d'incidence sur la vigne, même pour les espèces ombrageuses (Trambouze and Goma-Fortin 2013). Les plantations d'arbres en haute densité doivent être évitées pour leur conséquences sur la production viticole.

La présence d'arbres âgés de 8 à 10 ans peut induire un rafraîchissement ponctuel d'au maximum 2.5°C. Une diminution de la durée passée dans des températures supérieures à 30°C, borne maximale pour la photosynthèse, est observée occasionnellement (de 1h à 3h30 en moins en moyenne) par rapport aux autres vignes. Cette diminution de la température, maintenant l'activité photosynthétique est liée à un phénomène de convection et à l'ombrage des cultures. Les vignes qui ont subi les températures plus faibles pendant la floraison ont des rendements les plus élevés de la parcelle et les acidités les plus fortes. Les parcelles exposées à de fortes chaleurs nocturnes ont les rendements et les taux d'acidité les plus faibles (Bourgade et al. 2020). A l'opposé, en hiver, la présence de haies d'arbres compacts et de bandes boisées peuvent augmenter le risque de gel (Dufourcq and Rocque 2021).

Aucun effet significatif de la présence d'arbres à proximité des vignes sur leur vigueur et sur leurs rendements n'a été observé par rapport aux rangs de vignes plus éloignés des arbres (Bourgade et al. 2020). A l'inverse, une réduction de 9 à 31% est constatée dans le sud-est de la France lors de la mise en place de rangées d'arbres parallèles aux vignes tous les 3 ou 4 rangs à 3 mètres environ de distance des vignes (Trambouze and Goma-Fortin 2013).

La qualité des vins n'est pas significativement affectée par la présence d'arbres (Bourgade et al. 2020; Lang et al. 2019).

### Effets sur le temps de travail

La présence d'arbres dans les vignobles requiert une augmentation de main d'œuvre. Leur plantation nécessite environ 13h/ha et leur entretien environ 6h/ha/an les trois premières années (Bourgade et al. 2020). Cette augmentation du temps nécessaire rend cette technique aujourd'hui obsolète (Trambouze and Goma-Fortin 2013).

### Effets sur le coût de production

L'introduction d'arbres dans les parcelles viticoles est associée à des contraintes organisationnelles, à des coûts significatifs à long terme et à des profits incertains. Peu d'études se sont penchées sur la rentabilité des systèmes agroforestiers et encore moins en viticulture. Seule une référence sur l'investissement liés à la plantation d'arbres dans un vignoble existe. Elle estime la plantation de 100 Cormiers par hectare à 1 074 €/ha en 2000. Il est à noter que ce coût varie selon la densité plantée, les essences choisies et le système de protection adopté. D'autres systèmes agroforestiers mis en place dans d'autres cultures sont estimés sur 30 ans à 4 580€/ha ou à 43 € par mètre linéaire de haie en bordure (Bourgade et al. 2020).

A 75 arbres par hectare, la main d'œuvre est le poste le plus coûteux, qui représente 85% du montant total. L'entretien des arbres ou des haies arbustives est l'activité la plus coûteuse. Elle représente 77% des fonds, par rapport à la planification (3%) et à la plantation (20%). L'entretien des arbres est à adapter en fonction de l'objectif qui leur est assigné. Ces opérations sont coûteuses mais nécessaires pour une conduite efficace des parcelles en agroforesterie (Bourgade et al. 2020).

Des coûts supplémentaires liés à des modifications des opérations culturales du vignoble peuvent être engendrés. Il s'agit, par exemple, du passage d'une récolte mécanique à une récolte manuelle à cause de la forme et la taille des arbres. A l'inverse, le témoignage de certains agriculteurs montre que les enjambeurs arrivent à passer au-dessus d'arbres taillés. Leur présence améliore, selon eux, le passage des machines lors de la récolte car les baies tombent plus facilement (Canet 2018).

La plantation d'arbres à la place de pieds de vignes réduit les objectifs de rendements des vignes à l'hectare. Arrivés à maturité, ils pourraient entrer davantage en compétition pour la lumière, l'eau et les nutriments, pouvant impacter négativement les rendements des vignes. La revalorisation de leur production (fruits ou bois) varie selon les essences. Les débouchés de la production de bois manquent encore aujourd'hui de visibilité, notamment car la densité d'arbres dans les parcelles viticoles serait plus faible par rapport aux autres systèmes agroforestiers de référence. Bourgade et al. (2020). Le coût du système n'est pas compensé par une augmentation du revenu (Trambouze and Goma-Fortin 2013).

### Effets sur l'atténuation du changement climatique

La présence de 30 arbres/ha séquestre entre 0.45 et 0.9 tC/ha/an et des haies d'arbres stockent environ 0.1 tC.ha/an pour 100ml/ha (Bachevillier et al. 2015). Aucune donnée comptabilisant les émissions liées à l'entretien d'arbres implantées en viticulture n'a été trouvée.

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

L'implantation d'arbres dans les vignobles a des externalités positives sur la biodiversité, bien que les études soient encore trop récentes pour en tirer des conclusions. La présence d'arbres réduit les risques d'érosion et de compaction du sol. Ils l'enrichissent. Une valeur ajoutée pour les consommateurs, les riverains et les touristes en termes de paysage est créée (Bourgade et al. 2020; Trambouze and Goma-Fortin 2013).

#### d. Bilan

La présence d'arbres en viticulture permet d'augmenter la séquestration de carbone dans le sol. Ils ont un effet variable dans la lutte contre les ravageurs des vignes. Il n'y aurait pas de compétition dans ce type de système pour l'eau. Une concurrence azotée est néanmoins débattue. Les arbres sont intéressants lors des fortes chaleurs car ils assurent un microclimat frais, ce qui améliore qualitativement les vins dans ces conditions. A l'inverse, en hiver, ils peuvent favoriser les gelées. Ils ont des effets contrastés sur les rendements. Leur entretien entraîne une augmentation du temps de travail et du coût de production. Ils peuvent également induire des coûts additionnels pour l'entretien de la vigne. Des profits issus de la valorisation de leur production peuvent être obtenus mais ne sont pas encore bien évalués aujourd'hui.

Un manque de recul sur cette pratique est constaté. Des études sur des parcelles avec des arbres plus âgés restent à réaliser. Les analyses technico-économiques et environnementales doivent également être approfondies. L'adaptation des systèmes vitiforestiers à la mécanisation, les rendant économiquement viables est nécessaire à leur diffusion. Ce système pourrait être complété par de l'enherbement pour préserver la qualité des sols et la biodiversité (Canet 2018).

## C. 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.

Aucune variété ne cumule systématiquement tous les critères d'intérêts (résistance au stress abiotiques, capacité de rendement, résistance aux bio-agresseurs, 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.

### 1. Résultats obtenus

#### Effets sur l'utilisation des intrants

##### Pesticides

La majorité des variétés résistantes aux bio-agresseurs 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).

En viticulture, l'utilisation de variétés résistantes nécessite 0 à 3 traitements contre l'oïdium et le mildiou, par rapport à 6 ou 7 traitements pour des cépages traditionnels. Cela représente une économie de 60 à 90% du coût des traitements et de la pulvérisation contre ces maladies. Les régions, les millésimes, les cépages sont des facteurs influençant ces résultats, tout comme le type de production (conventionnel ou biologique) (Pinto 2017).

##### 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 indiquent évaluer l'adaptation de la variété aux itinéraires techniques dont l'accès à l'eau est limité, certains estiment que cela n'est pas bien pris en considération (Quenin 2020).

Certains cépages adaptent leur physiologie, pour résister à la sécheresse (Carbonneau and Ojeda 2013). Le choix du porte-greffe et de la profondeur de ses racines est important pour anticiper la contrainte hydrique des vignes (Marguerit et al. 2011).



## 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).

En viticulture, beaucoup d'études montrent que les cépages résistants obtiennent des rendements de 10t/ha à 20t/ha, qui sont généralement plus élevés que les rendements obtenus pour les cépages témoins traditionnels. Les aptitudes agronomiques des cépages ne sont pas les seuls facteurs influençant le rendement. Le millésime, les caractéristiques pédologiques, le système de conduite et l'itinéraire technique jouent également sur le rendement (Pinto 2017).

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

## Effets sur le temps de travail

En viticulture, 4 à 5 heures de traitements peuvent être évitées grâce à l'utilisation de cépages résistants (Pinto 2017).

## Effets sur le coût de production

Le coût des cépages résistants en viticulture est 1,5 à 2 fois plus élevé que celui de plants traditionnels (Pinto 2017). En comparaison à l'utilisation de cépages traditionnels, leur utilisation en production conventionnelle induit une économie du coût de production de 21% par hectare de vignes. Une économie de 15% du coût total de production par hectare de vigne est constatée en production biologique (Pinto 2017).

## 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). En viticulture, l'utilisation de cépages résistants permet de réduire jusqu'à 57% les émissions de GES par rapport à des cépages traditionnels (Pinto 2017).

## 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. 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).

## 2. Remarques

Les cépages résistants peuvent être à l'origine de frais supplémentaires, malgré la réduction du coût de production et les bons rendements qu'ils permettent. Aucune prime à la plantation n'est donnée pour ces cépages, contrairement à certains cépages traditionnels. Les caves semblent également moins intéressées par des cépages résistants que par des cépages traditionnels et les rémunèrent donc moins. Ces nouveaux cépages ont besoin de communication pour se faire reconnaître par le grand public, ce qui génère un coût (Pinto 2017). Le recours aux technologies nouvelles génomiques pourrait être décisif en la matière afin de faire la synthèse des caractéristiques des cépages traditionnels et des résistances recherchées. En cela, le travail d'adaptation de la réglementation européenne lancée par la Commission est un pas essentiel.

## 3. 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).

L'utilisation de cépages résistants paraît comme un moyen d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des pesticides, bien que le risque d'augmentation du coût de production ne soit pas négligeable.

Les variétés 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 ne sont pas suffisamment pris en compte lors de l'inscription au catalogue.

### II. Efficiences de l'usage d'intrants

#### A. Pulvérisation confinée

Une diversité de type de pulvérisateurs existe en viticulture, les plus communs sont les voûtes pneumatiques, les pulvérisateurs face par face et les aéroconvecteurs (Adrien Vergès 2020). Les pulvérisateurs à panneaux de récupération existent depuis de nombreuses années, autrefois utilisés en hiver pour lutter contre les maladies du bois. Cette technique a récemment été adaptée pour réaliser des traitements de couverture, face par face. L'utilisation d'appareils à panneaux de récupération pour les traitements foliaires est encore peu répandue (Adrien Vergès 2020).

Différents modèles de panneaux récupérateurs existent comme les panneaux récupérateurs pneumatiques ou ceux à jet porté. Les seconds semblent être les plus performants en termes de qualité de pulvérisation et de contrôle de la dérive (Auvergne et al. 2021; Carra, Codis, Delpuech, Vergès, et al. 2017).

Le choix des buses a également son importance. Les buses à injection d'air réduisent les risques de dérives par rapport aux buses classiques à turbulence (Adrien Vergès 2020). Pour finir, le choix de la vitesse influe également sur la performance de la pulvérisation (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

## 1. Résultats obtenus

### Utilisation des pesticides

#### Grâce aux pulvérisateurs

Les pulvérisateurs à panneaux récupérateurs permettent de récupérer en moyenne 40% des produits pulvérisés. Cette économie varie en fonction des saisons. Elle peut approcher les 70% lors des premiers traitements à cause de la faible couverture du feuillage et réduit avec la croissance du végétal. Lorsque la végétation est pleinement développée, 10 à 15% des produits sont économisés. Un essai mené dans un domaine de 1000 ha a constaté une réduction de 50% de sa consommation de produits phytosanitaires grâce à l'acquisition de 25 pulvérisateurs à panneaux récupérateurs (Adrien Vergès 2020; Auvergne et al. 2021). Ces résultats varient également selon les modèles d'appareils à panneaux récupérateurs (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

Les appareils à panneaux récupérateurs augmentent les quantités de produits déposées sur les feuilles. L'application de produits sur la végétation est aussi réalisée de façon plus homogène. Ces pulvérisateurs assurent une protection phytosanitaire plus fiable que les pulvérisateurs de type aéroconvecteur ou voûte pneumatique (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

#### Grâce aux buses

Le choix du type de buse impacte également la quantité de bouillie pulvérisée sur les vignes. Les buses à injection d'air forment des gouttes plus grosses que les buses à turbulence classiques. Elles assurent des dépôts équivalents voire supérieurs aux buses à turbulence classiques, une meilleure répartition du produit au sein du couvert végétal et un moindre risque de dérive (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

### Effets sur le rendement

Il existe peu d'informations sur l'effet de la pulvérisation confinée sur les rendements. Les traitements sont effectués pour atteindre des rendements ciblés. On pose donc l'hypothèse que ces technologies cherchant à augmenter l'efficacité d'utilisation des pesticides n'ont pas d'effets sur les rendements.

### Effets sur le temps de travail

Une perte de temps de chantier est constatée lors de l'utilisation de pulvérisateurs à panneaux récupérateurs. Ces derniers traitent au maximum deux rangs de vignes par passage. D'autres techniques permettent de traiter quatre rangs par passage, élevant ainsi leur débit de chantier (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017; Adrien Vergès 2020).

Une attention particulière doit être portée à l'entretien des appareils à panneaux récupérateurs et des buses. Le nettoyage des buses à injection d'air et du matériel associé préconisé (filtres, pompes filtrantes...) est d'1h30, ce qui représente une contrainte importante (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

Néanmoins, des essais ont montré que sur des terrains non accidentés, les panneaux récupérateurs offrent une bonne qualité de pulvérisation pour des vitesses d'avancement allant jusqu'à 9 km/h par rapport aux 5 km/h habituels (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017; Adrien Vergès 2020). Cette augmentation de la vitesse d'avancement peut dans certains cas compenser la perte de temps de chantier.

### Effets sur le coût de production

Les pulvérisateurs munis de panneaux récupérateurs ont un coût d'achat supérieur aux pulvérisateurs communément utilisés. Cette augmentation était comprise entre 10 000 et 50 000€ en 2017 selon les modèles et les options. A ce coût d'achat s'additionnent une augmentation du coût de la main d'œuvre à cause du temps de nettoyage plus élevé et d'une potentielle augmentation du temps de chantier.

Les buses à injection d'air ou dites anti-dérives ont un coût deux fois supérieurs aux buses à turbulence classique, qui varie selon leurs autres caractéristiques, telles que la matière et leur angle de pulvérisation.

Le bilan économique de la pulvérisation confinée dépend des caractéristiques de l'exploitation. En cas de nombreux traitements pour contrer une forte pression sanitaire, les surcoûts sont compensés par l'économie de produits qui est d'en moyenne 40%. Dans le cas inverse, seuls les bénéfices environnementaux compenseront les coûts (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017; Adrien Vergès 2020).

### Effets sur l'atténuation du changement climatique

La pulvérisation confinée a peu d'impact sur les émissions de GES et sur la séquestration de carbone. Son principal effet est la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> indirectes liées à une moindre utilisation de pesticides.

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

Les pulvérisateurs avec panneaux récupérateurs réduisent les pertes de produits pulvérisés causées par la dérive vers le sol et l'air de 15 à 30 fois par rapport aux pulvérisations classiques (Adrien Vergès 2020; Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017). La dérive d'application est divisée par 3 lors de l'utilisation de pulvérisateurs à jet porté équipés de buses à injection d'air (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017). Une moindre dérive réduit la contamination du sol et de l'air par les traitements phytosanitaires. La qualité de ces compartiments est préservée, ce qui joue en faveur de la qualité des eaux souterraines et de surface ainsi que de la biodiversité.

## 2. Remarques

La praticité de ces pulvérisateurs est débattue. Ils sont réputés comme étant complexes à utiliser. Bien qu'adaptables, leur maniabilité dans les parcelles peut varier en fonction des conduites choisies et de la largeur des inter-rangs. Leur intérêt dépend aussi de la topographie de l'exploitation car ils sont limités aux parcelles peu pentues (Adrien Vergès 2020; Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

Si l'augmentation de la vitesse d'avancement est mise en avant pour réduire le temps de chantier, elle est à doser avec précaution. Une vitesse trop importante peut défavoriser la récupération du produit et donc la performance environnementale (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

Les pulvérisateurs confinés à jet porté avec des buses à injection d'air semblent les plus performants en terme d'efficacité d'intrants et d'environnement. La petite taille des orifices de ce type de buse accroît leur risque de bouchage par rapport aux buses classiques (Carra, Codis, Delpuech, Montegano, et al. 2017).

La fermeture de tronçons existe mais pas celle de buse individuelle.

Face au manque de développement d'autres technologies, comme la fermeture de buse individuelle en viticulture, la pulvérisation confinée semble une alternative intéressante. Il est recommandé d'utiliser ces pulvérisateurs avec l'appui de conseillers et/ou d'OAD (outils d'aide à la décision) tels qu'Optidose (Adrien Vergès 2020).

## 3. Bilan

Les pulvérisateurs à panneaux récupérateurs à jet porté semblent être les plus performants en qualité de pulvérisation (efficacité et homogénéité de la pulvérisation) et au niveau environnemental (réduction de la dérive). Ils le sont d'autant plus lorsqu'ils sont équipés de buses à injection d'air. L'impact de la pulvérisation confinée semble nul sur les rendements et est minime sur les émissions de GES. Ces technologies ont un coût d'achat plus élevé et sont décrites comme complexe à utiliser. Elles peuvent augmenter le temps de travail car les temps de chantier et de nettoyage sont plus longs. Ces inconvénients peuvent être partiellement ou totalement compensés par une économie de pesticides et une augmentation de la vitesse d'avancement. Leur bilan économique dépend des caractéristiques du vignoble.

### 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 3, 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 page 26. A partir du troisième niveau, ces outils sont associés aux outils de modulation des doses. Ils sont traités page 30. Les niveaux 4 et 5 additionnent aux outils des niveaux précédents la robotisation comme alternative aux pesticides pour la gestion des bio-agresseurs et de l'irrigation. Les outils sont traités page 36 (Farm Europe 2019).

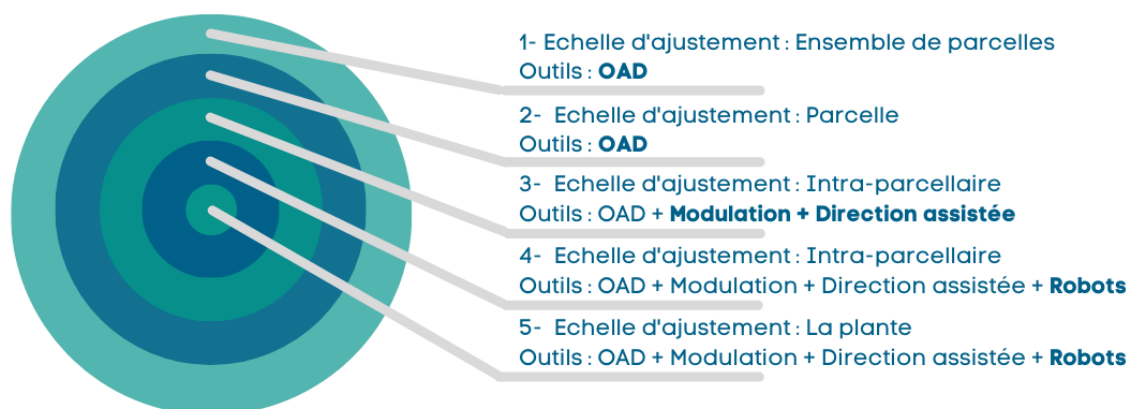


Figure 3 - Les cinq niveaux de l'agriculture digitale

## 1. Outils d'aide à la décision

Les outils d'aides à la décision (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 du matériel et réglages) ;
- Les pratiques complémentaires (choix variétal, rotations, méthodes préventives...) (Arvalis 2019).

Cette partie se concentre sur les OAD aidant à raisonner l'utilisation d'intrants (pesticides, engrais et eau). L'ajustement manuel des intrants sur les différentes zones de la parcelle, à partir de cartographies, y est également détaillée.

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 type de sol, du climat. Ces informations sont renseignées par les viticulteurs, mesurées par images satellites, ou en temps réel via des capteurs, des caméras, des stations météo (Farm Europe 2019).

## a. Résultats obtenus

### Utilisation des intrants

#### Pesticides

Beaucoup d'OAD cartographient le vignoble ou ajustent les programmes de traitements fongicides aux risques phytosanitaires à partir de stations météo (Zébic 2016). C'est notamment le cas d'Optidose® qui permet une réduction des doses de fongicides d'en moyenne 30%, variant de -15 à -50% selon les années, les lieux et les cépages (Dubois 2018). Un autre outil développé par l'ICV, Décitrait® assure des réductions comprises entre 20 et 35% d'après l'ICV (Montigaud 2020). Cette moyenne française est confortée par une autre étude italienne qui obtient une réduction de 25% des quantités de pesticides appliquées à partir d'une carte de prescription sans compromettre le rendement (Román et al. 2020).

#### Engrais

Une étude a comptabilisé une économie de 20 à 30% d'engrais dans les exploitations viticoles françaises grâce à l'utilisation d'OAD en viticulture par rapport à des méthodes traditionnelles (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). Une réduction entre 33 et 45% des engrais azotés et potassiques a été observée en Grèce (A. T. Balafoutis et al. 2017).

#### 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 33. Les prescriptions des OAD sur l'irrigation sont comparées à des systèmes irrigués sans OAD.

L'usage de la micro-irrigation, d'une irrigation goutte-à-goutte, peut induire une augmentation ou une diminution de consommation d'eau selon les secteurs de la parcelle, par rapport à la consommation standard. Seule une minorité de vignobles sont irrigués aujourd'hui en Europe. A titre d'exemple, moins de 10% des vignobles français disposent de tels systèmes (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). Ils connaissent cependant un regain d'intérêt dans les régions méditerranéennes dû à l'augmentation des températures et à la réduction des précipitations.

Parmi les différentes méthodes d'irrigation existantes, un regain d'intérêt a lieu pour la fertigation - ou fertirrigation ou irrigation fertilisante. En effet, cette dernière assure une meilleure assimilation des nutriments, qui ne peuvent être absorbés qu'en présence d'eau. Se faisant, elle permet des rendements plus élevés que lors d'apports d'engrais seuls.

L'irrigation des vignes a pour seul objectif de limiter la contrainte hydrique et impacte essentiellement la composition des baies qui vont se gorger d'eau. Cela joue ainsi sur leur volume, qui est cependant fortement lié à la génétique des cépages (Deloire 2019). Les quantités d'eau et leurs apports varient selon les cépages, les étapes du cycle végétatif, les contraintes hydriques rencontrées, le terroir et les objectifs ciblés. L'ajustement de l'irrigation allant de -16% à +8% par rapport à une parcelle témoin, constatée lors d'essais en fertirrigation, illustre ces variations (A. T. Balafoutis et al. 2017).

Des OAD peuvent aider à piloter l'irrigation et à en augmenter l'efficacité. Il s'agit essentiellement de modèles liés à des stations météo, sondes ou capteurs d'humidité. Mais des mesures *in situ* avec une chambre à pression restent essentielles pour s'assurer de la concordance entre le modèle utilisé et la réalité (Deloire 2019).

### Effets sur le rendement

Les OAD de gestion des intrants comme les engrais et les pesticides, ainsi que ceux aidant à la planification des vendanges vont améliorer la qualité des grappes plutôt que leur quantité, augmentant ainsi la valeur des vins produits (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). Généralement aucune réduction de rendement n'est observée en suivant les réductions de pesticides et d'engrais préconisés par ces OAD (Dubois 2018; Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). Bien qu'il n'y ait pas de corrélation irrigation et rendements, certaines expérimentations ont obtenu des accroissements de plus de 50% du rendement lors d'apport de 50 à 100 mm d'eau, en conditions méditerranéennes (Zébic 2016). A l'opposé, une réduction de l'irrigation n'a pas d'impact sur le rendement selon l'essai mené par Ortuani et al. (2019). L'étude de (A. T. Balafoutis et al. 2017) en Grèce en est un exemple, obtenant une augmentation du rendement de 16% en fertigation en adaptant manuellement les quantités d'engrais sur deux zones. Aucune information sur la qualité des raisins issus de ces rendements n'est précisée.

### 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). Certaines études montrent toutefois que la prise en main d'OAD préconisant les doses de traitements phytosanitaires entraîne un surcoût de 60€ par traitement chez certains prestataires. Ils n'ont, néanmoins, relaté aucune difficulté supplémentaire (Dubois 2018).

### Effets sur le coût de production

Le coût des OAD est d'environ 25 à 35€/ha ou de 250 à 500€/an (Montigaud 2020; Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021). Les OAD dépendent des données climatiques et météorologiques. Selon les types d'OAD utilisés, les viticulteurs peuvent avoir à mettre en place des stations météorologiques. Les stations météo demandent un investissement compris entre 400 € et 2 000 € (Weenat 2020). Ces stations peuvent être gérées et bénéficier aux organismes suivant les agriculteurs, à un agriculteur isolé ou à un groupe d'agriculteurs suffisamment proche géographiquement. A cela peut s'ajouter une augmentation du temps de travail (Dubois 2018).



## Effets sur l'atténuation du changement climatique

Il est reconnu que l'utilisation de cartographie des besoins des intrants permet une gestion plus efficiente des intrants et donc 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 N<sub>2</sub>O que les cultures non irriguées. Cette augmentation se situe entre 50 et 140%. L'irrigation de précision permettrait de réduire ces émissions en ajustant les quantités d'eau irriguées aux besoins des cultures (Soto et al. 2019).

Une réduction de 25% à 28,3% des émissions de GES a été obtenue en viticulture d'après une analyse de l'empreinte carbone de deux vignobles grecs. Cette empreinte carbone prenait en considération les émissions de GES liées à la production d'engrais, aux émissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O, à la production de pesticides, à la gestion des résidus de culture, ainsi qu'à la consommation d'énergie (A. T. Balafoutis et al. 2017). Mais selon d'autres études, le recours aux images satellites apporte une aide limitée dans l'adaptation de la viticulture au changement climatique (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021).

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

Une réduction de la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines est observée en viticulture lors de l'utilisation d'OAD liés à la gestion des engrais. Mais la contribution des images satellites reste limitée pour préserver la biodiversité et limiter la pollution de l'air et du sol (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021).

### 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 1% des vignobles 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.

Ces OAD sont limités car ils ne prennent pas en compte la variabilité des grappes et du microclimat. Une solution à développer à l'avenir pour y remédier serait de disposer de capteurs terrains automatisés (Zébic 2016).

### c. Bilan

En viticulture, 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. Les OAD améliorent surtout la qualité des rendements et n'influencent que peu la quantité. Encore peu développés, les OAD liés à la gestion de l'eau cherchent aussi à en améliorer l'efficacité. Leur principal objectif est d'ajuster l'apport d'eau pour limiter la contrainte hydrique et ses conséquences sur la composition des baies.

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 de la qualité des baies. 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

En viticulture, quelques épandeurs à engrais assurent un ajustement des quantités d'amendements, de fumier ou d'engrais en fonction des besoins mesurés. La pulvérisation de précision, qui adapte l'ouverture et la fermeture des buses à partir d'une cartographie des besoins ou à partir de données provenant de caméras embarquées est très peu développée et n'a pas dépassé le stade d'expérimentation.

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 du réseau d'irrigation 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 apparaissent doucement dans le parc des engins viticoles. Ils ont un coût plus conséquent que leur homologues standards (Zarco-Tejada, Hubbard, and Loudjani 2014).

## a. Résultats obtenus

### i. Ajustements des traitements phytosanitaires

#### Effets sur l'utilisation de pesticides

L'usage de pulvérisateurs modulant les doses d'intrants est bien moins développé en viticulture qu'en grande culture. Les OAD ajustant la quantité de pesticides en temps réel à partir de capteurs embarqués ou de télédétection sont encore aujourd'hui en phase d'expérimentation et permettent une économie de 16 et 58% de pesticides (Lorriette 2019; Soto et al. 2019; Raynal 2019). La seule façon de moduler les doses en viticulture est d'adapter la vitesse. L'essor actuel des pulvérisateurs à panneaux récupérateurs, détaillés page 22, peut expliquer le manque d'intérêt pour la modulation intra-parcellaire (Communication personnelle avec Thomas Crestey, Bruno Tisseyre et Jacques Rousseau 11/01/2021).

#### 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).

#### Effets sur le temps de travail

Peu d'études spécifiques à la viticulture quantifient l'effet de la pulvérisation de précision sur le temps de travail.

De façon générale, 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).

#### Effets sur le coût de production

D'après la revue de A. 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.

Les économies d'herbicides réduisent les coûts de production. A cela s'additionnent les coûts de main-d'œuvre et de carburant relatifs à ces technologies. Une économie de 20% est possible selon les données issues d'expérimentations présentées par Raynal (Lorriette 2019).

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 en moyenne à 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 (A. 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).

### 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 (A. Balafoutis et al. 2017).

### Autres 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 de précision

### Effets sur l'utilisation d'engrais

En viticulture, comme pour la protection phytosanitaire de précision, le développement d'épandeurs à engrais modulant les doses en est à son balbutiement. Quelques épandeurs à engrais testés permettent une économie d'engrais de 25 à 30% (Aubert 2020; Alexandre Abellan 2014; Communication personnelle avec Thomas Crestey, Bruno Tisseyre et Jacques Rousseau 11/01/2021).

### Effets sur le rendement

L'usage d'épandeurs de précision en viticulture améliore l'homogénéité de la vendange, ce qui améliore la qualité du rendement (Aubert 2020).

### Effets sur le temps de travail

Peu d'études spécifiques à la viticulture quantifient l'effet de la fertilisation modulée en temps réel sur le temps de travail. Comme il s'agit de technologies similaires à celles utilisées en grandes cultures, on peut estimer que leur effet sera du même ordre de grandeur.

En grandes cultures, le temps de travail lié à l'épandage d'engrais est réduit d'en moyenne 1,56% 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 2,19% et 2,29%. Les agriculteurs constatent une augmentation du temps de travail total de 2,82% en moyenne (Soto et al. 2019).

### Effets sur le coût de production

En viticulture, l'économie d'engrais que permettent les épandeurs à engrais testés se traduit en une économie de 9€/ha. Néanmoins, cette économie réalisée ne permet pas de rentabiliser l'investissement matériel (Gaviglio 2018c).

### Effets sur l'atténuation du changement climatique

La réduction des quantités d'engrais induit une diminution des émissions de N<sub>2</sub>O directes et indirectes. Couplée à une moindre utilisation de carburant, cela réduit les émissions de CO<sub>2</sub> directes et indirectes. Les émissions d'ammoniac sont également amoindries.

La fertilisation de précision 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 ces derniers de 3805 à 6567 kT eCO<sub>2</sub>/an, ce qui correspond à 1,5% 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

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

### Effets sur la consommation d'eau

Peu de données quantifiant les effets de techniques VRI 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). Comme décrit dans la partie sur les OAD, page 26, une minorité de vignobles sont aujourd'hui irrigués. L'irrigation goutte-à-goutte et la fertigation des vignobles est pourtant en plein essor, notamment autour de la Méditerranée. Le but de ces techniques est de lutter contre la contrainte hydrique en ajustant les quantités d'eau.

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.

## Effets sur le rendement

Comme décrit dans la partie portant sur les OAD, page 26, l'irrigation en viticulture influence la composition des baies, et donc la qualité du rendement plutôt que la quantité de baies produite (Sawyer, Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov 2021; Deloire 2019).

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 fertigation VRI devraient être de même ordre de grandeur voire supérieurs à ceux obtenus en ajustant manuellement la fertigation 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).

## Effets sur le coût de production

Le coût de l'adoption de l'irrigation de précision à partir de systèmes d'irrigation goutte à goutte préexistant est estimé à 40€/ha (Soto et al. 2019). A cela s'ajoute le coût des préconisations par les OAD. L'automatisation du temps de travail réduit les frais liés au pilotage de l'irrigation. En viticulture, jusqu'à 170€/ha/an peuvent être économisés (Paysan and Dufourcq 2018). Cela contrebalance une potentielle augmentation du temps de travail. La réduction de la consommation d'eau et d'engrais obtenue en fertigation induit une baisse du coût de production. Couplée à une augmentation du rendement, la marge brute s'accroît.

## Effets sur l'atténuation du changement climatique

Les cultures irriguées émettent plus de N<sub>2</sub>O 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).

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

La VRI minimise les risques de lixiviation et améliore la qualité des nappes phréatiques. L'oxydation des MOS est réduite, favorisant ainsi la qualité des sols (Stamatiadis 2013).

### b. Remarques

La possibilité d'utiliser ces technologies dépend du type de configuration du vignoble. Comme le montre la Figure 4, l'utilisation de ces technologies est possible dans la majorité des vignobles. Il existe cependant des régions où la possibilité de mettre en œuvre ces technologies est comprise entre 1 et 29% (Ghiglieno 2020).

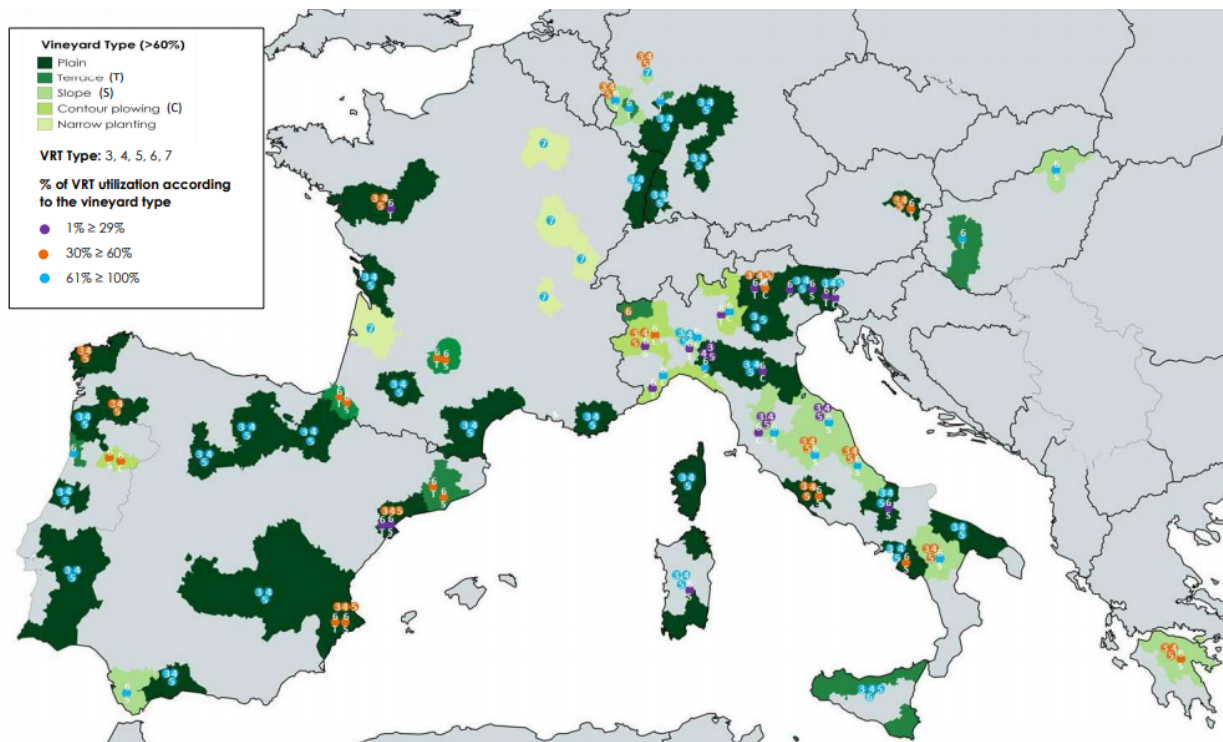


Figure 4 - Pourcentage d'utilisation des outils de modulation des doses selon les types de vignoble, source : Ghiglieno 2020

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

Les investissements peuvent être réalisés à l'échelle d'exploitations individuelles ou portés 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).

#### d. Bilan

Les technologies d'ajustement des quantités de pesticides et d'engrais en temps réel sont en cours d'expérimentation en viticulture. Les traitements phytosanitaires à taux variables peinent à se développer face à la concurrence de la pulvérisation confinée. Les effets de ces techniques sur la gestion efficiente de l'eau sont bien plus compliqués à analyser.

La protection phytosanitaire de précision maintient voire augmente quantitativement les rendements. La qualité des rendements est supérieure grâce à une homogénéisation du rendement que permet la fertilisation de précision. Une amélioration de la composition des baies est aussi obtenue en VRI.

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 pression sanitaire et aux besoins azotés et hydriques. Ce choix doit également tenir compte de la taille des utilisateurs (exploitation ou ensemble d'exploitations) ou en passant par des organismes tiers.

Alors que la fertilisation taux variable a la capacité de réduire les émissions de GES, l'irrigation de précision risque d'augmenter les émissions de GES si elle augmente le volume d'eau irriguée.

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.

### 3. Agriculture robotisée

La robotisation en viticulture est moins développée que dans d'autres secteurs agricoles mais semble prometteuse. Les robots sont aujourd'hui pensés pour entretenir les sols, pour aider lors de la récolte et de la taille, pour relever des données sur l'état des vignes ou encore pour porter des charges (Gaviglio 2018c). Si quelques robots commencent à être commercialisés, ils sont en majorité toujours en stade expérimental.

Comme pour les autres filières agricoles, la robotique en viticulture est développée en premier lieu pour faire face à la gestion des adventices (Gaviglio 2018c) De nombreux robots configurés pour atteler des outils de travail du sol, de l'inter-rang ou du cavaillon sont actuellement en développement ("La Bataille Des Robots Viticoles Est Lancée ?" 2018). Le recours aux robots pour l'entretien du sol mécanisé est détaillé page 42. Cette partie se concentre sur l'usage de robots appliquant des doses ajustées de pesticides.

Très peu de données quantifiant la performance de ces robots sont aujourd'hui disponibles car aucun d'entre eux n'a dépassé les phases expérimentales.



## a. Résultats obtenus

### Effets sur l'utilisation des pesticides

Bien qu'on suppose qu'une application de pesticide localisée et ajustée à la pression entraîne une réduction de l'usage de produits phytosanitaires, peu de données quantifiant cette réduction sont disponibles. Une étude en cours cherche à récupérer 80% du produit pulvérisé, ce qui correspond à la quantité de produits phytosanitaires qui n'est généralement pas retenue par le feuillage ("La Pulvérisation Confinée Vitibot" 2021).

La gestion mécanique du cavaillon et de l'inter-rang semble privilégiée à la pulvérisation d'herbicides par des robots modulant les doses.

### Effets sur le rendement

Aucune information sur l'impact des robots de pulvérisation sur les rendements n'est donnée. Si la détection des adventices, des maladies et des ravageurs est précise, ils auraient, en toute logique, un impact nul ou positif sur les rendements.

### Effets sur le temps de travail

Si certains estiment que les robots de pulvérisation permettent de lever certaines contraintes liées au temps de travail, cette réduction du temps de travail n'est pas quantifiée. Selon d'autres, les robots simplifieraient la pénibilité du travail mais leur utilisation nécessitant la présence de quelqu'un n'aurait pas d'incidence sur le temps de travail (Gaviglio 2018c).

### Effets sur le coût de production

Une économie liée à un moindre usage des intrants réduit le coût de production. Aucune étude ne quantifie ce taux de réduction qui dépend de la pression phytosanitaire. Cette économie ne permet pas d'amortir le coût des robots qui est compris entre 40 000€ et 150 000 € (Gaviglio 2018c). Le coût de la prestation à l'hectare varie de 1 500 à 3 500 €/an/ha. Ce prix aujourd'hui très élevé va tendre à diminuer dans les prochaines années avec la diversification de l'offre.

### Effets sur l'atténuation du changement climatique

Outre la potentielle réduction des émissions de GES liée à un moindre recours aux pesticides, une réduction des postes de carburant par rapport aux tracteurs existants serait observée (Gaviglio 2018c).

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

Les risques de dérive sont limités, réduisant ainsi la pollution de l'air, du sol et des nappes d'eau ce qui joue en faveur de la préservation de la biodiversité. Le poids des robots étant inférieur aux tracteurs actuels, ils évitent les problèmes de tassement (Gaviglio 2018c).

## b. Remarques

L'usage de la robotique en viticulture est intéressant pour faire face à la pression des adventices, notamment dans le cavaillon où la lutte mécanique risque d'endommager les ceps.

## c. Bilan

L'usage de la robotique en viticulture pourrait être une solution intéressante contre les maladies et contre les adventices du cavaillon (Gaviglio 2018c). Or le modèle technique et économique de la robotisation viticole n'est pas encore trouvé. Le coût de ces solutions, le nombre de robots aujourd'hui sur le marché et ceux encore au stade de développement en font une solution d'avenir plutôt qu'une solution actuelle.

### 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 dépôts d'incendies (Guyomard et al. 2013).

##### a. Désherbage mécanique

En viticulture, différents outils de désherbage mécanique sont utilisés pour le rang et l'inter-rang. Les plus communs pour le désherbage de l'inter-rang sont : la décaillonneuse, les inter-rangs à lames bineuses ainsi que les outils rotatifs arrachant et dispersant les adventices. Le désherbage mixte associe au désherbage mécanique de l'inter-rang un désherbage chimique sous le rang. La gestion de l'inter-rang peut être réalisée par des outils à disques ou à dents. Une tonte peut également avoir lieu s'il est enherbé. Toutes ces modalités rang/inter-rang ; désherbage mixte ou non ; type d'enherbement (total ou partiel) influent sur le nombre de passages d'outils, comme le montre les Tableau 5 et Tableau 6. Le nombre de passages moyen en désherbage chimique est de 1,7. Le nombre de passages en désherbage mixte ou mécanique est trois à quatre fois plus important (Jacquet et al. 2019).

Tableau 5 - Nombre de passages moyen en désherbage mécanique seul, source : Jacquet et al. 2019

	Traitement	Sans enherbement	Enherbement	Demi enherbement
Rang	Chimique	0	0	0
	Mécanique	3,1	2,5	2,7
Inter-rang	Mécanique	3,6	1	1,7
	Tonte	0	2,4	1,6
Total		6,7	5,9	6

Tableau 6 - Nombre de passages moyen en désherbage mixte, source : Jacquet et al. 2019

	Traitement	Sans enherbement	Enherbement	Demi enherbement
Rang	Chimique	1,5	1,8	1,8
	Mécanique	0,7	0,3	0,3
Inter-rang	Mécanique	3,1	0,4	1,4
	Tonte	0	3	1,7
Total		5,3	5,5	5,2

#### iv. Résultats obtenus

##### Effets sur l'utilisation des herbicides

Le désherbage mécanique permet de se passer d'herbicide. Une réduction de 33% de la dose d'herbicide peut avoir lieu en désherbage mixte (Jacquet et al. 2019).

##### Effets sur le rendement

L'impact des outils sur le réseau racinaire superficiel et les blessures occasionnées au niveau des souches peuvent entraîner une baisse de rendement allant de 5 à 20% dans les cas extrêmes. Les baisses de rendement sont surtout constatées les cinq premières années de désherbage mécanique. L'âge et la conformation des souches, le type de sol et l'implantation racinaire influencent également le rendement (Jacquet et al. 2019).

##### Effets sur le temps de travail

Les désherbages mécanique et mixte ont un débit de chantier bien plus long qu'en désherbage mécanique. Le temps de travail augmente en moyenne de 6,3h/ha à 10,7h/ha en désherbage mécanique, selon si la vigne est étroite ou large et si l'inter-rang est enherbé, semi-enherbé ou non enherbé. Le Tableau 7 détaille ces modalités. Cette augmentation est moindre en désherbage mixte, variant de 3,4h/ha à 6,8h/ha selon les modalités d'écartement des rangs et d'enherbement, comme le montre le Tableau 8.

Tableau 7 - Temps de travail supplémentaire en désherbage mécanique par rapport à un désherbage chimique (h/ha), source : Jacquet et al. 2019

Type de vignes	Sans enherbement	Enherbement	Demi enherbement
Étroites	10,7	11,5	6,3
Larges	9	6,3	8,4

Tableau 8 - Temps de travail supplémentaire en désherbage mixte par rapport à un désherbage chimique (h/ha), source : Jacquet et al. 2019

Type de vignes	Sans enherbement	Enherbement	Demi enherbement
Étroites	4,9	4,7	3,4
Larges	6,8	5	5

### Effets sur le coût de production

Les intrants (herbicides et carburants), la traction, la main d'œuvre, l'amortissement et les réparations du matériel sont considérés dans le coût de production. Le coût de la main d'œuvre et les charges liées à la mécanisation sont supérieurs au coût des pesticides, ce qui élève le coût de production. Il augmente en moyenne de 124 à 636 € en désherbage mécanique, selon si la vigne est étroite ou large et si l'inter-rang est enherbé, semi-enherbé ou non enherbé. Le Tableau 9 détaille ces modalités. Cette augmentation est moindre en désherbage mixte, variant de 38 à 241 € selon les modalités d'écartement des rangs et d'enherbement, comme le montre le Tableau 10.

Tableau 9 - Coût de production supplémentaire en désherbage mécanique par rapport à un désherbage chimique (€/ha), source : Jacquet et al. 2019

Type de vignes	Sans enherbement	Enherbement	Demi enherbement
Vignes étroites	333	445	636
Vignes larges	282	124	246

Tableau 10 - Coût de production supplémentaire en désherbage mixte par rapport à un désherbage chimique (€/ha), source : Jacquet et al. 2019

Type de vignes	Sans enherbement	Enherbement	Demi enherbement
Vignes étroites	241	205	38
Vignes larges	196	109	180

### Effets sur l'atténuation du changement climatique

Le nombre de passages plus élevé en désherbage mécanique et en désherbage mixte qu'en désherbage chimique, élèvent la consommation de carburant respectivement de 5,7 et de 3,4 fois en moyenne (Jacquet et al. 2019). Le désherbage mécanique va consommer une à cinq fois plus d'énergie que le désherbage chimique selon les hypothèses, ce qui se traduit en autant d'émissions directes supplémentaires de CO<sub>2</sub> (Gaviglio 2020).

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

En viticulture, la réduction d'herbicide permise par le désherbage mécanique améliore la qualité de l'eau.

## v. 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). La couverture d'adventices, leur stade de développement et l'état du sol impactent le type d'outil nécessaire et la date d'intervention. Les courbes et dénivelés augmentent le risque d'érosion en viticulture (Gaviglio 2020).

Les outils de désherbage demandent un investissement qui peut être réalisé au niveau d'un groupement de viticulteurs, 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). Une compréhension du sol et de la dynamique de la flore est requise pour limiter les risques d'érosion et de perte du rendement. Des formations et un suivi régulier sont recommandés pour pratiquer le désherbage mécanique (Gaviglio 2020).

Le passage de ces outils est à raisonner. 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).

## vi. Bilan

Le désherbage mécanique nécessite des outils spécifiques selon la localisation du désherbage en viticulture. 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 permet dans certaines conditions de se passer d'herbicide.

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 CO<sub>2</sub> 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 robots de désherbage sont surtout développés pour les cultures à forte valeur ajoutée avec un inter-rang large, comme en horticulture ou en viticulture. Leur recours est en plein développement : plusieurs robots sont disponibles sur le marché et de nombreux projets de prototype sont en cours. La forme des robots varie selon leur utilité (traction, tondeuse...) et leur capacité à atteler des outils qui leur sont spécifiques ou des outils habituellement utilisés par le viticulteur.

Le désherbage mécanique de l'inter-rang est déjà performant et efficace. L'enjeu de la robotisation se concentre donc sur l'entretien du cavaillon où la difficulté est de ne pas blesser les pieds de vignes ni d'arracher les souches (Gaviglio 2018c). Si leurs performances sont connues qualitativement, très peu d'informations quantitatives sont disponibles (Gaviglio 2018c; Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

Les robots de désherbage mécanique se distinguent de robots pulvérisant de façon ultra-précise des herbicides, qui sont détaillés dans la partie modulation des doses, page 31. Certains agriculteurs combinent des robots de désherbage mécanique et chimique pour réaliser un désherbage mixte.

### i. Résultats obtenus

#### Effets sur l'utilisation des 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 2018a).

Les robots de désherbage mécanique ont une efficacité sur les adventices variant de 65 à plus de 82% (Fountas et al. 2020). Une réduction des traitements chimiques est constatée bien que l'entretien du cavaillon soit difficile (Gaviglio 2018c).

#### 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. Une tonte régulière par un robot de tonte évite qu'un enherbement n'induisse une contrainte hydro-azoté sur les vignes. Des dommages aux cultures peuvent être constatés en viticulture, lorsque les robots travaillent le long du cavaillon (Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

## Effets sur le temps de travail

Bien que l'utilisation de robots requière une présence humaine, ils réduisent le temps de travail de 20% environ (Barbière 2020). Ils permettent un ajustement de l'organisation pour se concentrer sur des opérations à plus forte valeur ajoutée et réduisent la pénibilité du travail (Gaviglio 2018a).

## 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).

Le coût du désherbage mécanique reste conséquent bien qu'il réduise d'année en année (Gaviglio 2018a). Un robot de désherbage reste plus cher qu'un désherbage chimique, l'investissement nécessaire étant de 25 000 € à 80 000 € (Farm Europe 2019). Des études estiment qu'investir jusqu'à 40 000€ dans un robot de désherbage sera toujours plus bénéfique sur le long terme que le désherbage mécanique. En viticulture, l'achat d'un robot représente environ 90% du coût du désherbage (Lowenberg-DeBoer et al. 2020).

## 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> directes (Lowenberg-DeBoer et al. 2020; Farm Europe 2019; A. 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). La polyvalence des robots, en viticulture notamment, les rendraient plus rentables (Gaviglio 2018a). 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).

### iii. Bilan

Bien que les robots de désherbage soient de plus en plus utilisés et que leur performance soit reconnue, 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, une réduction peut parfois être observée lors d'un désherbage mécanique intra-rang. La pénibilité de travail est réduite, permettant de réorganiser ses priorités. Ils réduisent potentiellement les émissions de CO<sub>2</sub> 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. En plein essor, des alternatives facilitant leur accessibilité se mettent en place.

## 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; Meyer 2018).

### 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). Les effets de certains de ces éléments sont détaillés dans les parties portant sur l'enherbement et l'agroforesterie, pages 9 et 16.

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 des pesticides

En viticulture, de nombreux produits de biocontrôle sont utilisés pour lutter contre les maladies fongiques comme le mildiou, la pourriture grise, l'oïdium et contre les ravageurs (acariens, cicadelles, thrips, mouches...). Les produits de biocontrôle permettent de réduire la présence des bio-agresseurs de 20 à 60% par rapport aux témoins sans contrôle (Winetwork 2020; Rotolo et al. 2018; Calvo-Garrido et al. 2019). Il est souvent recommandé de les coupler avec une protection phytosanitaire de synthèse (Dumoulin et al. 2019; Rotolo et al. 2018). D'après Rotolo et al. (2018), une telle association permet une efficacité de 96%, qui est supérieure à l'efficacité de traitements avec des pesticides de synthèse seuls (87%).

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).

### Effets 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. Mais leur efficacité est faible lorsqu'ils sont utilisés seuls et peut conduire à une perte de rendement allant jusqu'à 50 ou 60% par rapport aux rendements ciblés.

### 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 45 €/ha et 250 €/ha en viticulture (Winetwork 2020). 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 N<sub>2</sub>O et sur la séquestration de carbone. Ces pratiques sont généralement peu coûteuses en énergie directe et indirecte, limitant ainsi les émissions de CO<sub>2</sub> (Guyomard et al. 2013).

Certains agents de biocontrôle, comme des bactéries ou des champignons peuvent produire du NH<sub>3</sub> (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. 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 faite 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 (Meyer 2018; 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 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 (Guyomard et al. 2013).

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 (Bailey 2014).

### iii. Bilan

Les produits de biocontrôle 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 CO<sub>2</sub> 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). Il s'agit d'une technique largement développée en viticulture et en arboriculture.

## 1) Résultats obtenus

### Réduction des insecticides

Jusqu'à quatre traitements d'insecticides spécifiques aux insectes ciblés peuvent être évités grâce à la confusion sexuelle. Certaines années, il est même possible d'éviter le recours à ces insecticides (Thiéry, Delbac, and Laurence 2019).

### Effets sur le rendement

Les rendements ne sont pas affectés par l'utilisation de la confusion sexuelle. Il s'agit d'une méthode préventive qui peut être utilisée seule ou couplée avec un traitement insecticide curatif selon la pression constatée pour assurer maintien du rendement (Le Bars et al. 2019).

### Effets sur le temps de travail

Cette méthode demande de la technicité et donc de l'observation pour poser les dispositifs au bon moment et au bon endroit. Les distributeurs de phéromones se renouvellent annuellement, et demandent entre 0,5 et 5h de pose par hectare et par an. Il faut compter entre 4 et 6h par hectare et par an d'observation pour mettre les dispositifs au bon moment, au bon endroit et réagir si la pression est trop forte. En contrepartie, une réduction des charges de travail liées aux traitements chimiques a lieu. Une meilleure répartition du travail durant la saison est constatée malgré une augmentation du temps de travail (Herbin 2011; Le Bars et al. 2019).

### Effets sur le coût de production

La mise en place de distributeurs de phéromones coûte entre 150 et 350€/ha, suivant le nombre de générations et d'insectes que l'on souhaite contrôler (Herbin 2011; INRA 2018). Ce coût est supérieur à celui des insecticides de synthèse. A cela s'ajoute le coût de la main d'œuvre nécessaire pour la pose des dispositifs et les observations. Une réduction des charges de produits phytosanitaires, de mécanisation et de carburant a lieu si le nombre de traitements insecticides est réduit (Le Bars et al. 2019).

### Effets sur l'atténuation du changement climatique

Le coût énergétique lié à la fabrication de phéromone est inférieur à celui des pesticides, ce qui réduit les émissions de CO<sub>2</sub> indirectes. La confusion sexuelle ne nécessite pas d'interventions mécanisées en viticulture, ce qui réduit les émissions de CO<sub>2</sub> directes. Si le nombre de traitements insecticides diminue, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est observée (Guyomard et al. 2013; Le Bars et al. 2019).

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

L'innocuité des phéromones et leur potentiel à réduire l'utilisation d'insecticides joue en faveur de la biodiversité. Il y a toutefois un risque d'émergence de bio-agresseurs secondaires, comme la tordeuse de la pelure, s'il y a un moindre recours aux insecticides à large spectre. Une amélioration de la qualité de l'eau et de l'air est également constatée (Le Bars et al. 2019).

## 2) Remarques

La capacité de la confusion sexuelle à contrôler la troisième génération de bio-agresseurs est parfois contestée. Bien que cette technique tende à se généraliser, certains agriculteurs refusent d'utiliser cette solution déjà coûteuse s'ils doivent réaliser des traitements insecticides en plus (Goinere 2020).

## 3) Bilan

La confusion sexuelle permet en viticulture de diminuer le nombre de traitements insecticides sans compromettre le rendement. La performance économique est variable. Cette solution est plus coûteuse que les insecticides de synthèse et augmente le besoin de main d'œuvre. Néanmoins, une réduction des charges liées aux carburants, à la mécanisation et aux insecticides a lieu. La biodiversité est ainsi préservée et les émissions de GES sont réduites, améliorant la qualité de l'eau et de l'air.

### 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

##### Effets sur l'utilisation de pesticides

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 (Daire, Aveline, and Bidaut 2018; Faessel et al. 2014).

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 (Daire, Aveline, and Bidaut 2018).

##### Effets sur le rendement

Les rendements et leur qualité sont, à cause de la variabilité d'action des SDN, inférieurs ou égaux aux rendements obtenus en ayant recours aux pesticides (Guyomard et al. 2013; Faessel et al. 2014).

## 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 (Daire, Aveline, and Bidaut 2018; Petit, Aveline, and Molot 2020). 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 voire très supérieur aux fongicides en viticulture. 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; Petit, Aveline, and Molot 2020).

## 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 (Gayrard and Delval 2017). 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 (Gayrard and Delval 2017).

### 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 les 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 organiques

En viticulture, l'azote a un rôle essentiel dans le fonctionnement de la vigne et dans ses rendements, aussi bien en termes de qualité qu'en termes de quantité. La gestion de l'azote est raisonnée en priorité par l'intermédiaire des MO du sol. Il s'agit des substances et composés carbonés d'origine animale ou végétale en décomposition qui constituent la litière et l'humus stable. Ces MO assurent, entre autres, le stockage et la mise à disposition des minéraux pour les plantes. Elles tendent à décroître dans les sols viticoles depuis quelques décennies, sauf dans les parcelles enherbées ou là où le bois de taille est restitué (Gontier 2021).

Le maintien et l'augmentation du stock de MO du sol sont réalisés par les amendements. Il s'agit d'apports importants réalisés tous les 3-4 ans (Comifer 2012a). Les autres apports azotés sous forme d'engrais organique ou de synthèse n'ont lieu que si la gestion de la MO est correcte et des carences sont diagnostiquées.

#### a. Résultats obtenus

##### Effets sur la consommation d'engrais

Les doses des apports varient fortement selon le rendement visé, le type de sol et son entretien. Elles peuvent être nulles, si l'objectif de rendement est faible ou atteindre 90 kg N/ha si l'objectif de rendement est élevé. Ces quantités sont beaucoup plus faibles que les quantités d'azote mises à disposition lors de la plantation. Ces dernières varient de 150 à 250 kg N/ha pour un apport de 30 à 50 tonnes de compost de fumier par hectare et de 500 à 550 kg N/ha pour un apport de 60 tonnes de compost de déchets verts par hectare (Comifer 2012a).

##### Effets sur le rendement

Une caractérisation fine du potentiel de fertilisation des amendements et engrais organiques ainsi que de la disponibilité des éléments nutritifs pour le couvert est essentielle pour répondre aux besoins du sol (Guyomard et al. 2013). L'épandage d'un amendement ou engrais organique bien caractérisé et ajusté aux besoins du sol et des cultures devrait permettre d'atteindre les rendements ciblés (Gontier and Cahurel 2021).

##### Effets sur le temps de travail

Les amendements ont lieu tous les 3 ou 4 ans et entraînent une augmentation ponctuelle de la charge de travail. Le temps et la pénibilité de travail pour les viticulteurs est égale que ce soit pour l'apport d'engrais organique ou d'engrais de synthèse.

##### Effets sur le coût de production

Le coût d'acquisition et d'épandage d'amendements ou d'engrais organiques est considéré comme inférieur à celui des engrais de synthèse (Guyomard et al. 2013).

## Effets sur l'atténuation du changement climatique

Pour une application théorique de 50 kg/ha, les amendements organiques divisent les émissions de N<sub>2</sub>O par 6 par rapport aux engrais organiques et organo-minéraux et par 4 par rapport aux engrais minéraux. Lors de leur usage, les émissions de CO<sub>2</sub> sont 3 à 5 fois inférieures que pour les engrais avec des fractions organiques (Galbrun 2012).

D'après Navarro et al. (2017), les émissions de N<sub>2</sub>O par les engrais organiques sont d'en moyenne 0.023 kg de CO<sub>2</sub>e par bouteille de 75 cL, soit par kg de grappe. Sachant qu'un hectare de vigne produit en moyenne 8 tonnes de grappes, cela correspond environ à 184 kg CO<sub>2</sub>e/ha. Les engrais de synthèse émettent en moyenne 0.017 kg de CO<sub>2</sub>e de N<sub>2</sub>O par bouteille de 0.75 cL, soit par kg de grappe et leur production correspond en moyenne à des émissions de 0.012 kg de CO<sub>2</sub>e par bouteille de 0.75 cL, soit par kg de grappe. Sachant qu'un hectare de vigne produit en moyenne 8 tonnes de grappes, la fabrication et l'épandage d'engrais de synthèse émet en moyenne 232 kg CO<sub>2</sub>/ha. Ainsi, d'après leur étude sur 18 vignobles français et espagnols, l'usage d'engrais organique émet 20% de moins de CO<sub>2</sub>e que l'usage d'engrais de synthèse.

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

Les amendements organiques améliorent la fertilité physique, chimique et biologique du sol (Galbrun 2012). Ces quantités d'azote organique parfois conséquentes ont toutefois un impact faible vis-à-vis des flux azotés perdus car les produits utilisés génèrent peu d'azote disponible et donc lixiviable (Comifer 2012b). Le maintien ou l'amélioration de la MO du sol assure la rétention et la dégradation des micropolluants organiques et issus des pesticides ce qui améliore la qualité de l'eau (Gontier 2021). L'épandage d'amendements et d'engrais organiques peut s'accompagner d'une augmentation d'émissions de NH<sub>3</sub> (Guyomard et al. 2013).

### b. Bilan

La disponibilité des nutriments, notamment d'azote, est assurée par la présence de MO dans les sols. Les MO peuvent être maintenues ou augmentées grâce aux amendements. Le recours aux engrais organiques ou de synthèse a lieu par la suite, si une carence est observée. Les quantités d'amendements sont relativement faibles. Elles s'adaptent aux besoins du sol et aux rendements ciblés. L'épandage d'amendement a lieu tous les 3-4 ans, induisant une augmentation ponctuelle du temps de travail. Le temps de travail est équivalent pour les engrais organiques ou de synthèse. L'acquisition d'engrais de synthèse est plus coûteux que pour les engrais et amendements organiques. Les amendements émettent moins de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>O que les engrais organiques ou de synthèse. Les engrais organiques émettent plus de N<sub>2</sub>O que les engrais de synthèse. Le bilan GES de ces derniers, couplant émissions de CO<sub>2</sub> liées à leur fabrication et émissions de N<sub>2</sub>O renverse la balance. Les amendements jouent en faveur de la fertilité des sols, de la biodiversité et de la qualité de l'eau, mais des émissions de NH<sub>3</sub> compromettant la qualité de l'air peuvent avoir lieu.



## 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. 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. En viticulture, elles sont mises en place durant quelques mois à quelques années dans les inter-rangs (Baddeley et al. 2017).

### a. Résultats obtenus

#### Effets sur la consommation d'engrais

En viticulture, la présence d'engrais verts contenant des légumineuses dans les inter-rang restitue entre 35 et 45kg N/ha (IFV 2019). Ces quantités sont similaires aux besoins azotés de la vigne qui sont en moyenne de 20 à 30 kg N/ha lors d'un objectif de rendement moyen. Lors de gros objectifs de rendements, elles peuvent combler une partie des besoins azotés de la vigne, qui nécessite jusqu'à 70 kg N/ha. Des études ont montré que la vigne bénéficie de l'azote fourni par les engrais verts. Or l'usage de ces derniers en tant qu'alternative aux engrais azotés est très peu développé en Europe. Cela pourrait en partie s'expliquer par les risques de concurrence des cultures de légumineuses sur les ressources en eau et en azote (Garcia et al. 2018; MATRAY 2019).

#### Effets sur le rendement

L'impact des engrais verts sur les rendements est discuté en viticulture. Plusieurs essais ne montrent pas de différence significative entre les rendements obtenus avec des engrais verts ou minéraux (MATRAY 2019; Zanzotti and Mescalchin 2019). D'autres montrent que la compétition pour les ressources en eau et en azote par les engrais verts durant la floraison et la formation des baies peut induire une baisse des rendements (MATRAY 2019). Une destruction tardive des engrais verts peut également faire différer la mise à disposition de l'azote des besoins des vignes. Lorsque l'azote est disponible au moment de la fermeture des grappes et de la véraison, une augmentation de 19 à 65% de la teneur azotée des raisins a été observée (Ivaldi 2014).

Le type de destruction influence aussi les rendements. L'enfouissement des engrais verts peut entraîner une augmentation de la vigueur de plus de 30% ainsi qu'une augmentation du taux de débourrement l'année suivante, par rapport à un simple broyage-roulage.

#### Effets sur le temps de travail

En viticulture, la préparation du sol, le semis, l'entretien et la destruction des couverts d'engrais vert nécessitent entre 5h30 et 8h30 par ha et par an (Arino 2009).

## Effets sur le coût de production

La mise en place d'engrais verts sur tous les inter-rangs d'une parcelle de vigne à l'automne coûte entre 90 et 290€/ha environ. Ce prix inclut le coût de la main d'œuvre, de la traction et des semences. Sa destruction coûte environ 35€/ha et son enfouissement 55€/ha (IFV 2019; Arino 2009).

## Effets sur l'atténuation du changement climatique

Une étude réalisée à l'échelle de la Sicile estime que la présence d'engrais vert réduit le budget carbone de 45% par rapport à une gestion conventionnelle. Les émissions de GES quantifiées par hectare et par an sont données Figure 5. La mise en place d'engrais verts en rangs alternés permet de réduire les émissions de GES jusqu'à 70% par rapport à une gestion conventionnelle. L'ensemble des pratiques réalisées (travail du sol, fertilisation, gestion des ravageurs, récolte et gestion des résidus d'élagage), ainsi que les caractéristiques pédoclimatiques ont été prises en compte (Novara et al. 2020).

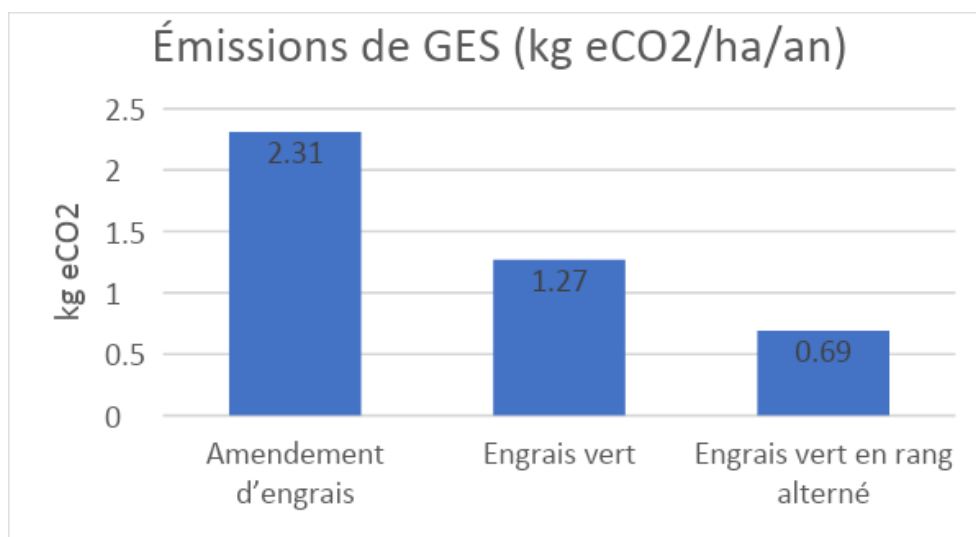


Figure 5 - Émissions de GES en fonction du type d'apport azoté, source : Novara et al. (2020)

## 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 (IFV 2019; Thomas, 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.

Des effets nématocides ont été observés pour certains engrais verts tels que la tagète des parfumeurs, l'avoine ou les crotalaires. Mais ces effets sont spécifiques à certains genres de nématode et ne concernent pas, par exemple, ceux qui transmettent le court noué.

Des exploitations viticoles où les vendanges se font manuellement ont abandonné les engrais verts pour des considérations sociales. En effet, les engrais verts gênent les ouvriers et favorise la présence de tiques.

## c. Bilan

Bien que peu développés en viticulture en Europe, les engrais verts peuvent y substituer jusqu'à la totalité des engrais azotés, selon les objectifs de rendement fixés.

Cette compensation a lieu à condition que l'azote fourni par les engrais verts soit disponible au moment où la vigne en a besoin. Aucune différence significative de rendement n'est observée par rapport à l'apport d'engrais. 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 et la mise en place d'engrais verts a un coût. Les engrais verts réduisent les émissions de N<sub>2</sub>O, de CO<sub>2</sub> et améliore le taux de COS. La biodiversité, la structure des sols et la qualité de l'eau sont améliorées.

## IV. Résultats

### A. Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation des intrants

#### 1. Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation des pesticides

Le Tableau 11 compile les résultats moyens obtenus par les différentes pratiques par rapport au recours à des pesticides de façon conventionnelle. Il s'agit de moyenne ou de résultats observés lors d'études.

Les pratiques pouvant influencer les quantités d'herbicides consommées sont considérées comme satisfaisantes lorsque leur efficacité sur les adventices est de l'ordre de 80%.

Les pratiques dont l'effet est positif si elles sont couplées à une dose de pesticides, dont l'effet sur la consommation totale de pesticides est inférieur à 10% ou dont l'efficacité est très variable sont présentées en orange.

Les pratiques, représentées en vert, qui semblent induire une réduction de la consommation de pesticides intéressante sont :

- L'agriculture robotisée pouvant permettre une réduction de l'ordre de 80% ;
- La sélection variétale pouvant permettre une réduction de l'ordre de 50 à 75% ;
- L'ajustement des traitements phytosanitaires pouvant permettre une réduction de l'ordre de 16 à 58% ;
- La pulvérisation confinée pouvant permettre une réduction de l'ordre de 38% ;
- Les OAD phytosanitaires pouvant permettre une réduction de l'ordre de 30%.

Une de ces pratique fait partie de la stratégie de reconception du système, les autres font partie de la stratégie d'efficacité.

Tableau 11 - Effets des pratiques étudiées sur l'utilisation des pesticides

	<b>Fongicides</b> 83% des pesticides	<b>Insecticides</b> 13% des pesticides	<b>Herbicides</b> 5% des pesticides	<b>Consommation totale de pesticides</b>
Enherbement			↘ 50% à 67%	1,7% à 2,5%
Paillage			↘ 25% à 80% d'adventices	↘ 0% à 5%
Agroforesterie & haies		Effets contrastés non quantifiés		
Sélection variétale	↘ 60% à 90%			↘ 50% à 75%
Pulvérisation confinée	↘ 40%	↘ 40%		↘ de 38%
OAD				↘ 30%
Ajustement des traitements phytosanitaires				↘ 16% à 58%
Agriculture robotisée				↘ 80%
Désherbage mécanique			↘ 33% à 100%	↘ 1,5% à 5%
Désherbage mécanique robotisé			↘ 65% à 82% d'adventices	
Lutte biologique	↘	↘		↘
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 à 60% des bio-agresseurs par rapport au témoin</li> <li>• 96% si associé à des traitements phytosanitaires*</li> </ul>			
Confusion sexuelle		↘ jusqu'à 4 traitements d'insecticides **		↘ 13% au max
SDN	↘ 0% à 100%	↘ 0% à 100%		↘ 0% à 96%***

\*Efficacité supérieure au témoin traithimiquement (87%)

\*\*Peut permettre de se passer d'herbicides

\*\*\*Il est très peu probable d'atteindre la réduction maximum car les SDN sont spécifiques à un ravageur or plusieurs ravageurs sont présents dans les vignes

## 2. Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation d'engrais.

Les engrais sont appliqués pour répondre à des rendements ciblés en terme quantitatif et qualitatif. Ainsi le Tableau 12 présente les effets des pratiques sur l'utilisation des engrais et sur le rendement.

Tableau 12 - Effets des pratiques étudiées sur la consommation d'engrais et sur le rendement

	Utilisation d'engrais	Rendements	
		Quantité	Qualité des baies
Enherbement	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite + 30 kg/ha lors de la mise en place</li> <li>Risque de compétition</li> </ul>	↘ variable, 9% selon une étude	= ou ↗
Agroforesterie & haies	Effets contrastés : <ul style="list-style-type: none"> <li>↘ de 8% à 20% de l'azote assimilable</li> <li>Pas d'influence des arbres sur la vigueur de la vigne</li> </ul>	Effets contrastés : = ou ↘ de 9% à 31%	Pas affectée
OAD	↘ de 20 à 45%		↗
Ajustement des doses Fertilisation de précision	↘ de 25 à 30%		↗
Engrais organiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable, de 0 à 90 kg/ha</li> <li>Inférieure aux quantités appliquées lors de la plantation</li> </ul>	L'utilisation d'engrais dépend des rendements ciblés	
Engrais verts	Peut combler 50 à 100% des besoins azotés	Risque de compétition pour l'eau et l'azote durant la période de floraison et de formation des baies	<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ de 19% à 65% de la teneur en azote des mous</li> <li>↗ de la vigueur et du débourrement</li> </ul>

La majorité des pratiques influence la qualité des mous. Certaines d'entre elles, comme l'enherbement, la vitiforesterie ou les engrais verts peuvent induire une baisse quantitative du rendement. La différence de type d'engrais (de synthèse ou organique) n'a pas d'impact sur l'efficacité de leur utilisation. L'augmentation de la vigueur et du débourrement liée aux engrais verts peut avoir des externalités positives ou négatives selon le contexte des parcelles et les conditions pédoclimatiques.

Les pratiques relatives à la stratégie d'efficacité d'utilisation, soit l'utilisation d'OAD et la fertilisation de précision semblent les plus intéressantes à promouvoir concernant la gestion de la fertilisation.

### 3. Effets des pratiques sur l'efficacité d'utilisation de l'eau

L'eau a un effet direct sur l'assimilation des engrais par les vignes et joue donc sur la quantité et la qualité des rendements. Le Tableau 13 présente les effets des pratiques sur la consommation d'eau et sur les rendements par rapport à la non irrigation.

Tableau 13 - Effets des pratiques étudiées sur la consommation d'eau et sur le rendement

	Consommation d'eau	Rendements	
		Quantité	Qualité des baies
Enherbement	Variable selon les saisons, les climats, les types de sols et d'enherbements	↘ variable, 9% selon une étude	= ou ↗
Paillage organique	↘ de 40% pour les paillages organiques par rapport à un paillage de synthèse	↘ de 20% à 25%	
Paillage de synthèse		Effets contrastés : <ul style="list-style-type: none"> <li>↗ jusqu'à 11 fois dans des conditions extrêmement sèches</li> <li>↘ de 30% dans des conditions clémentes</li> </ul>	
Agroforesterie & haies	Pas de contrainte hydrique	Effets contrastés : = ou ↘ de 9% à 31%	Pas affectée
OAD	↘ de 16 à 8% en fertigation	Pas de corrélation ; <ul style="list-style-type: none"> <li>= ou ↗</li> <li>↗ de 16% à 50% en fertigation par rapport à une non-utilisation d'irrigation en méditerranée</li> </ul>	
Ajustement des doses Irrigation à taux variable	Efficacité de l'irrigation : = ou ↗ que ce que permettent les OAD liés à la gestion de l'irrigation et de fertigation		

Les pratiques comme l'enherbement, les paillages organiques et de synthèse et la vitiforesterie concernent l'efficacité de l'utilisation de l'eau disponible dans le sol. Si elles permettent de maintenir l'humidité au niveau du sol ou si elles n'induisent pas de contraintes hydriques, elles ont des effets constatés ou négatifs selon les contextes pédoclimatiques.

Ces pratiques se distinguent des pratiques liées à la stratégie d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation qui regroupent les OAD, l'irrigation à taux variable et la fertigation. Ces dernières semblent maintenir ou augmenter les rendements.

## B. Effets des pratiques sur les conditions socioéconomiques

Les effets des pratiques sur les conditions socioéconomiques sont synthétisés dans le Tableau 14. Les pratiques ayant plus de deux effets négatifs sur le rendement, le temps de travail ou le coût de production n'ont pas été retenues. Les pratiques induisant une réduction quantitative du rendement ou une augmentation du temps de travail supérieure à 3h ont également été écartées.

La sélection variétale et l'utilisation d'engrais organique sont les pratiques ayant un impact positif sur le rendement, le temps de travail et le coût de production.

Les OAD, l'ajustement des traitements phytosanitaires, la fertilisation de précision et l'irrigation à taux variable peuvent induire une légère augmentation du temps de travail lors de la prise en main de l'outil.

L'enherbement spontané semble une autre pratique intéressante du point de vue socioéconomique, tout comme le désherbage mécanique robotisé dont l'investissement est inférieur à 40 000€.

La robotisation de la viticulture semble une technique prometteuse face au temps de travail, mais elle n'est pas rentable aujourd'hui.



Tableau 14 - Effets des pratiques étudiées sur les rendements, le temps de travail et le coût de production

	Rendements		Temps de travail par rapport à une gestion chimique	Effets sur le coût de production
	Quantité	Qualité des baies		
Enherbement	↘ variable, 9% selon une étude	= ou ↗	↗ par 2,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ de 6 à 10 fois (660 à 900 €/ha/an de plus)</li> <li>Economie de 15 à 26 €/ha/an possible en enherbement spontané</li> </ul>
Paillage organique	↘ de 20% à 25%		↘ de 20%	↗ 5 à 18 fois (640 à 1830 €/ha/an de plus)
Paillage de synthèse	Effets contrastés : <ul style="list-style-type: none"> <li>↗ jusqu'à 11 fois dans des conditions extrêmement sèches</li> <li>↘ de 30% dans des conditions clémentes</li> </ul>		↗ de 17%	↗ de 3 fois
Agroforesterie & haies	Effets contrastés : = ou ↘ de 9% à 31%	Pas affectée	Chronophage : <ul style="list-style-type: none"> <li>Plantation : ↗ par 5 ;</li> <li>Entretien les trois premières années : ↗ par 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plantation : ≈1000€/ha</li> <li>Coût sur 30 ans estimé à 4600€/ha ou 43€/mL</li> </ul>
Sélection variétale	Rendements de 10 à 20t/ha qui sont généralement supérieurs aux rendements des cépages traditionnels		↘ de 4h à 5h de traitements par an	↘ de 15 à 21%
Pulvérisation confinée			Débatue : <ul style="list-style-type: none"> <li>↗ du temps de chantier et nettoyage</li> <li>↘ du temps grâce à une augmentation de la vitesse</li> </ul>	↘ 40% de produits en cas de forte pression phytosanitaire
OAD	Pas de corrélation : <ul style="list-style-type: none"> <li>= ou ↗</li> <li>↗ de 16% à 50% en fertigation par rapport à une non-utilisation d'irrigation en méditerranée</li> </ul>	↗ grâce aux OAD liés à la fertilisation	Variable : <ul style="list-style-type: none"> <li>↗ temps lié à la maîtrise de cette technique</li> <li>↘ temps de travail</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+25 à +35€/ha ou</li> <li>+250 à +500€/an</li> </ul>
Ajustement des traitements phytosanitaires	= ou ↗		Variable : <ul style="list-style-type: none"> <li>↗ temps lié à la maîtrise de cette technique</li> <li>↘ temps de pulvérisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rentable si l'économie de pesticides est supérieure à 14€/ha</li> <li>↘ de 20% des pesticides possible</li> <li>Amortis à 3 ou 4 ans</li> </ul>

Fertilisation de précision		↗	↗ de 2,82%	<ul style="list-style-type: none"> <li>↘ de 9€/ha de pesticides possible (sans prendre en compte la rentabilisation du matériel)</li> </ul>
Irrigation à taux variable		= ou ↗ de l'efficacité de l'irrigation	Variable : <ul style="list-style-type: none"> <li>↗ temps lié à la maîtrise de cette technique</li> <li>↘ temps de travail</li> </ul>	Potentiel gain de 130€/ha
Agriculture robotisée			↘ pénibilité du travail	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economies de pesticides non quantifiés, ne permettant pas, aujourd'hui, d'amortir le coût des robots</li> </ul>
Désherbage mécanique	↘ de 5% à 20% dans les cas extrêmes		↗ du temps de travail de 3,4h/ha en désherbage mixte à 10,7h/ha en désherbage mécanique seul	↗ de 40 à 640€ selon le type de désherbage et la configuration
Désherbage mécanique robotisé	Non quantifié = si l'efficacité sur les adventices est supérieure à 80%		↘ 20% du temps de travail	<ul style="list-style-type: none"> <li>Supérieure au désherbage chimique (entre 25 000 et 80 000)</li> <li>Rentable si &lt; à 40 000 €</li> </ul>
Lutte biologique	↘ jusqu'à 60% si utilisée seule avec beaucoup de bio-agresseurs		= à ↗ selon les modalités de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ de 45€/ha à 250€/ha qu'un traitement chimique</li> </ul>
Confusion sexuelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Méthode préventive</li> <li>Pas d'impact sur le rendement</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ de 4,5h et 11h par ha/an</li> <li>Meilleure répartition du temps de travail</li> </ul>	↗ de 4 à 8 fois, besoin de main d'œuvre supplémentaire
SDN	Inférieurs ou égal par rapport à l'utilisation de pesticides		↗	
Engrais organiques	Variable selon les rendements ciblés		=	Inférieurs aux engrais de synthèse
Engrais verts	Risque de compétition pour l'eau et l'azote durant la période de floraison et de formation des baies	<ul style="list-style-type: none"> <li>↗ de 19% à 65% de la teneur en azote des mous</li> <li>↗ de la vigueur et du débourrement</li> </ul>	↗ de 5h30 à 8h30 par ha/an	= à 2 fois plus

### C. Effets des pratiques sur les performances environnementales et climatiques

Les effets des pratiques sur le bilan des émissions de GES émises et sur les différents compartiments de l'écosystème (eau, sol, air, ainsi que sur la biodiversité) sont donnés Tableau 15. Pour chaque pratique, les quantités de carbone séquestrées sont converties en eCO<sub>2</sub> et soustraites aux émissions liées à la pratique. Chaque composante environnementale est analysée de façon qualitative comme décrit en Méthodologie, page 6.









Parmi les pratiques étudiées, seules l'enherbement et l'agroforesterie ont un effet sur la séquestration de carbone. Les pratiques dont leur capacité à réduire les émissions de GES ont été quantifiées, celles qui ont une action favorable sur les différentes composantes environnementales sont :

- Les engrais verts, dont la capacité de réduction des émissions de GES observée varie entre -45 et -70% ;
- La sélection variétale, dont la capacité de réduction des émissions de GES observée est d'environ -57% ;
- Les OAD liés à la gestion des pesticides et des fertilisants, dont la capacité de réduction des émissions de GES observée varie entre -25 et -28% ;

Les émissions de GES liées à la viticulture restent néanmoins très inférieures aux émissions liées à la vinification.

Tableau 15 - Effets des pratiques étudiées sur l'atténuation du changement climatique et sur les composantes environnementales

	Effets sur l'atténuation du changement climatique (sur les émissions de GES)	Autres effets sur :			
		Le sol	L'eau	La biodiversité	
				L'air	
Enherbement	<p>Bilan GES :</p> <p>Emissions de CO2 comprises entre -1.8 et +0.34 de CO2/ha/an</p>	●	●	○	●
		Fertilité physique, chimique et biologique			
Paillage organique	↘ de -3%	●	●	●	●
		Fertilité physique, chimique et biologique			
Paillage de synthèse	↗ de 200% (ACV)	○	○	○	○
Agroforesterie & haies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 arbres par ha séquestrent entre 0,45 et 0,9 tC/ha/an</li> <li>• 0,1 tC/ha/an pour 100ml/ha de haies</li> <li>• Pas d'info sur les émissions liées à l'entretien</li> </ul>	●	○	○	●
		Fertilité physique			
Sélection variétale	↘ de 57% des émissions de GES par rapport à des cépages traditionnels	●	●	○	●
		Fertilité physique			
Pulvérisation confinée	↘ non quantifiée	○	●	●	●
OAD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ↘ de 25% à 28% pour les traitements phytosanitaires et la fertilisation ;</li> <li>• ↗ de 50% à 140% de N2O dans les cultures irriguées par rapport à la non-irrigation</li> </ul>	○	●	○	○
Ajustement des traitements phytosanitaires	Identiques	○	●	●	●
Fertilisation de précision	↘ de 5%	○	●	○	●
Irrigation à taux variable	↗ de 50% à 140% de N2O dans les cultures irriguées par rapport à la non-irrigation	●	●	○	○
		Fertilité chimique			

Agriculture robotisée	<ul style="list-style-type: none"> <li>↳ potentielle mais non quantifiée</li> </ul>	 <p>Fertilité biologique</p>
Désherbage mécanique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ↗ 1 à 6 fois la consommation de carburant;</li> <li>• ↗ 1 à 6 fois la consommation d'énergie;</li> <li>• ↳ de l'usage d'herbicide non quantifiée</li> </ul>	
Désherbage mécanique robotisé	<ul style="list-style-type: none"> <li>↳ non quantifiée</li> </ul>	 <p>Fertilité physique</p>
Lutte biologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>↳ non quantifiée</li> </ul>	 <p>↗ des émissions de NH3 selon les produits utilisés mais ↗ qualité de l'air</p>
Confusion sexuelle	<p>Non quantifié :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ↳ si appliqué seuls</li> <li>• ↗ si appliqué avec pesticides</li> </ul>	 <p>Préservation de la faune et de la flore mais risque d'émergence de bio-agresseurs secondaires</p>
SDN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• = si appliqué seuls</li> <li>• Supérieur si appliqué avec pesticides</li> </ul>	 <p>Variable selon l'écotoxicologie</p>
Engrais organiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>↳ de 20% par rapport aux engrais de synthèse</li> </ul>	 <p>↗ de la fertilité physique chimique et biologique des sols mais faible impact sur la lixiviation</p> <p>↗ potentielle des émissions de NH3</p>
Engrais verts	<ul style="list-style-type: none"> <li>↳ de 45% à 70%</li> </ul>	 <p>Fertilité physique, chimique et biologique</p>

## V. Discussion

### A. Les pratiques intéressantes à promouvoir au niveau européen

Les pratiques ayant été mises en avant pour leurs effets bénéfiques sur la consommation des intrants, sur les conditions socio-économiques et sur les aspects environnementaux et climatiques sont récapitulées dans le Tableau 16.

Tableau 16 - Synthèse des pratiques les plus bénéfiques sur l'efficacité d'utilisation des intrants, sur les conditions socio-économiques et sur les performances environnementales et climatiques

	Effets sur la consommation :			Effets sur les conditions socio-économiques :	Effets sur les performances environnementales & climatiques
	de pesticides	d'engrais	d'eau		
Enherbement	○	○	○	●	○
Paillage	○	○	○	○	●
Sélection variétale	●	○	○	●	●
Pulvérisation confinée	●	○	○	●	●
OAD	●	●	●	●	●
Ajustement des traitements phytosanitaires	●	○	○	●	○
Fertilisation de précision	○	●	○	●	○
Irrigation à taux variable	○	○	●	●	○
Agriculture robotisée	●	○	○	○	○
Désherbage mécanique robotisé	○	○	○	●	○
Engrais organiques	○	○	○	●	○
Engrais verts	○	○	○	○	●

Aucune pratique n'est une solution clef, elles ont toutes des avantages et des inconvénients. Au vu des objectifs climatiques et environnementaux de l'Europe, les pratiques les plus intéressantes à promouvoir sans compromettre la performance socio-économique des viticulteurs semblent être l'utilisation d'OAD, la **pulvérisation confinée** et la **sélection variétale**.

Les autres pratiques restent néanmoins des alternatives ayant d'autres effets. Parmi celles qui n'ont pas été mises en avant, beaucoup induisent une réduction du rendement, une augmentation de la main d'œuvre et du coût de production. Il s'agit entre autres de l'enherbement, des engrais verts ou du désherbage mécanique mixte. Ces pratiques peuvent être intéressantes à mettre dans des vignobles de petites tailles et à faible objectif de rendement tels que les AOP. Il en est de même pour les pratiques préventives comme la lutte biologique qui peut être couplée à des pesticides si la pression des bio-agresseurs est trop forte.

La viticulture de précision (ajustement des doses d'intrants) et la robotisation pourraient être des solutions d'avenir due à leur coût actuel et à leur état de développement.

Certaines de ces pratiques, notamment celles ayant recours à des technologies récentes (OAD, agriculture de précision, robots...) nécessitent des formations, un accompagnement et une analyse du sol pour bénéficier au maximum de leur potentiel. L'utilisation de cépages résistants n'est efficace que si les traitements sont adaptés aux pressions phytosanitaires.

## B. Les limites et perspectives

Il s'agit ici d'une revue réalisée au niveau européen à partir de résultats d'expérimentation. Il semble nécessaire de confronter ces résultats avec des retours de viticulteurs.

Pour certaines pratiques, les résultats, obtenus dans les conditions particulières ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble des régions viticoles européennes. En effet, le choix des pratiques est fortement dépendant du contexte de l'exploitation et de la parcelle. Outre les conditions pédoclimatiques et la topographie du vignoble, l'âge de la vigne, le système de conduite des vignes, la possibilité de mettre en commun du matériel ou d'utiliser du fumier issu d'exploitations voisines, la proximité de zones urbaines conditionnent les pratiques qu'il est possible d'implémenter. La taille des exploitations a son importance pour que les OAD, l'ajustement des quantités d'intrants et la robotisation permettent des résultats tangibles, notamment au niveau environnemental (A. Balafoutis et al. 2017).

Les conclusions des études regroupées dans cette revue peuvent parfois être réalisées trop hâtivement, notamment concernant l'effet des pratiques sur la qualité du sol et sur la séquestration de carbone. En effet, l'effet de changement de pratique sur le sol peut être observée au bout de sept ans.

Les résultats des études sur lesquels se base cette revue sont analysés en fonction des éléments étudiés (consommation d'intrants, rendement, coût de production...). Ces résultats sont en réalité issus de l'interaction de l'ensemble des pratiques réalisées sur la parcelle et en fonction de ses conditions pédoclimatiques. Pour prendre en compte l'ensemble de ces pratiques il serait nécessaire de montrer la complémentarité des pratiques.

## Bibliographie

- Adrien Vergès. 2020. "La Pulvérisation Confinée En Viticulture." Institut Français de La Vigne et Du Vin. 2020. <https://www.vignevin.com/article/la-pulverisation-confinee-en-viticulture/>.
- Agrobiofilm Consortium. 2013. "Compostable Films for Agriculture."
- Alexandre Abellan. 2014. "La Fertilisation Raisonnée Vue Du Ciel." Vitisphere. 2014. <https://www.vitisphere.com/actualite-63010-Viticulture-de-precision-la-fertilisation-raisonnee-vue-du-ciel.htm>.
- Arino. 2009. "Les Engrais Verts En Viticulture." In *Pulvérisation et Entretien Du Sol En Viticulture Durable*, edited by IFV, 17.
- Arvalis. 2019. "OAD - Conduites de Cultures." 2019. <https://www.arvalis-infos.fr/tous-les-outils-d-aide-a-la-decision-conduite-des-cultures-@/view-1457-arvstatiques.html>.
- Aubert, Irène. 2020. "Ils Ont Adopté La Fertilisation Modulée." Mon-Viti. 2020. <https://www.mon-viti.com/articles/viticulture/ils-ont-adopte-la-fertilisation-modulee>.
- 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."
- Auvergne, Christophe, Renaud Cavalier, Sébastien Codis, and Adrien Verges. 2021. "Guide Du Pulvérisateur En Vigne Large." [https://gard.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Occitanie/Agroenvironnement/guide\\_pulve\\_ca34\\_2021.pdf](https://gard.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Agroenvironnement/guide_pulve_ca34_2021.pdf).
- Bachevillier, Yves, Rémi Cardinael, Sylvie Barthes, Christophe Lafon, Camille Beral, Fabien Liagre, Daniele Ori, Pierre Labant, and Pierre Vignaud. 2015. "L'agroforesterie, Un Outil "carbone Pour Les PCET."
- 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>.
- Badier, Michel, Christophe Joffroy, Anne Buchet, Alice Reumaux, and Martine Maurice. 2019. *Référentiel Économique Du Vigneron*®. [http://www.vinopole-cvdl.com/fileadmin/images-users/Referentiel\\_Vigneron\\_72.pdf](http://www.vinopole-cvdl.com/fileadmin/images-users/Referentiel_Vigneron_72.pdf).
- Bailey, karen L. 2014. "Chapter 13 - The Bioherbicide Approach to Weed Control Using Plant Pathogens." *Integrated Pest Managment*, 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.
- Balafoutis, Athanasios T., Stefanos Koundouras, Evangelos Anastasiou, Spyros Fountas, and Konstantinos Arvanitis. 2017. "Life Cycle Assessment of Two Vineyards after the Application of Precision Viticulture Techniques: A Case Study." *Sustainability* 9 (11). <https://doi.org/10.3390/su9111997>.
- 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%252eecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fUtiliser\\_La\\_Confusion\\_Sexuelle](https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fUtiliser_La_Confusion_Sexuelle).
- Benoit, P. 2010. "Enherbement Des Sols : Quels Effets Possibles." *Fourrage* 202: 95–102.
- Bourgade, E, Alonso Ugaglia A, V Bustillo, T Dufourcq, J Grimaldi, J Guenser, V Montagne, and L Ranjard. 2020. "VITIFOREST : Evaluation de l'impact de l'arbre Agroforestier En Contexte Viticole." *Innovations Agronomiques* 79 (July): 471–97.
- Calvo-Garrido, Carlos, Jean Roudet, Nicolas Aveline, Ludivine Davidou, Séverine Dupin, and Marc Fermaud. 2019. "Microbial Antagonism toward Botrytis Bunch Rot of Grapes in Multiple Field Tests Using One Bacillus Ginsengihumi Strain and Formulated Biological Control Products." *Frontiers in Plant Science* 10 (February). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00105>.
- Canet, Alain. 2018. *Viticulture et Agroforesterie*. Ver de Terre production. <https://www.youtube.com/watch?v=VhQyRmRVoz8&list=PLQNBggapGeH9ytT0lwUfKzTutovUB9kHl&index=2>.
- Carbonneau, Alain, and Hernan Ojeda. 2013. "Écophysiologie et Gestion de l'eau En Viticulture." *INRA Science et Impact*. [https://www1.montpellier.inra.fr/pechrouge/images/carbonneau\\_ecophysiologie\\_fiches\\_2013.pdf](https://www1.montpellier.inra.fr/pechrouge/images/carbonneau_ecophysiologie_fiches_2013.pdf).
- Carra, Mathilde, Sébastien Codis, Xavier Delpuech, Patrick Montegano, Xavier Ribeyrolles, Bernadette Ruelle, Blandine Savajols, and Adrien Vergès. 2017. "Les Panneaux Récupérateurs Atouts et Limites." Montpellier. [https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2020/03/2017-Article\\_panneaux\\_recuperateurs\\_IFV-IRSTEA.pdf](https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2020/03/2017-Article_panneaux_recuperateurs_IFV-IRSTEA.pdf).
- Carra, Mathilde, Sébastien Codis, Xavier Delpuech, Adrien Vergès, Bernadette Ruelle, Patrick Montegano, Xavier Ribeyrolles, and Blandine Savajols. 2017. "Pulvérisation : Atouts et

Limites Des Panneaux Récupérateurs.” *Phytoma* 703: 5.

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>.

Comifer. 2012a. “Calcul de La Fertilisation Azoté - Vigne.” [https://comifer.asso.fr/images/pdf/Fiches\\_cultures/fiche-culture\\_vigne.pdf](https://comifer.asso.fr/images/pdf/Fiches_cultures/fiche-culture_vigne.pdf).

— — —. 2012b. “Vigne - Calcul de La Fertilisation Azotée.”

Costa, Joaquim Miguel, Margarida Vaz, José Mariano Escalona, Ricardo Egipto, Hipolito Medrano, and Maria Manuela Chaves. 2020. “Water as a Critical Issue for Viticulture in Southern Europe: Sustainability vs Competiveness.” *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*, March. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.3182>.

Daire, X., N. Aveline, and F. Bidaut. 2018. “LES SDP EN VITICULTURE.” In *Natural Products & Biocontrol*, edited by Elicitra.

Deloire, Alain. 2019. “L’irrigation Permet de Maintenir, Pas d’augmenter Le Rendement.” *Mon-Viti*. 2019. <https://www.mon-viti.com/articles/viticulture/lirrigation-permet-de-maintenir-pas-daugmenter-le-potentiel-de-rendement>.

Delpuech, Xavier. 2014. “L’enherbement Sous Le Rang: Une Nouvelle Alternative Au Désherbage Chimique de La Ligne Des Ceps?” *Paysan Du Midi*, 2 p. [https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2018/12/AE41\\_EnherbementRang.pdf](https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2018/12/AE41_EnherbementRang.pdf).

Dubois, Victor. 2018. “Optidose , Un Outil Majeur Pour Réduire Les Intrants Phytosanitaires Au Sein Du Vignoble de La Maison Lavau-Maucoil , Dans Le Cadre Du Plan Gouvernemental Ecophyto To Cite This Version : HAL Id : Dumas-01869519 Mémoire de Fin d ’ Études Présenté Pour l ’.”

Dufourcq, Thierry, and Anastasia Rocque. 2021. “Gel et Dégats Sur Les Vigne.” Institut Français de La Vigne et Du Vin. 2021. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/gel-et-degats-de-gel-sur-vigne/>.

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.”

European Commission. 2017. “Vineyards in the EU - Statistics.” Eurostat. 2017. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Vineyards\\_in\\_the\\_EU\\_-\\_statistics&oldid=397227](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Vineyards_in_the_EU_-_statistics&oldid=397227).

- 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 Environnementales de l'Agriculture Digitale."
- . 2021. *THE IMPACT OF THE FARM TO FORK AND BIODIVERSITY STRATEGY – LOTS OF PAIN FOR LITTLE GAIN*. Bruxelles.
- 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>.
- Frey, Hélène. 2016. "Analyse Des Pratiques d'enherbement Des Viticulteurs et Formalisation Des Règles de Décision Utilisées Pour Le Pilotage." SupAgro Montpellier.
- Froger, Camille. 2020. "Impact d'un Enherbement Sur La Vigne En Situation de Forte Pente."
- Galbrun, C. 2012. "Bien Choisir Ses Fertilisants Pour Limiter Ses GES." *Réussir Vigne*. 2012. <https://www.reussir.fr/vigne/bien-choisir-ses-fertilisants-pour-limiter-ses-ges>.
- Garcia, Léo, Florian Celette, Christian Gary, Aude Ripoché, Hector Valdés-Gómez, and Aurélie Metay. 2018. "Management of Service Crops for the Provision of Ecosystem Services in Vineyards: A Review." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 251 (October 2017): 158–70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>.
- Garnica, Irache, Juan Antonio Lezaun, José Luis González-Andújar, Verónica Pedraza Jimenez, Daniele Antichi, Christian Frascioni, Stefano Carlesi, et al. 2020. "Experimental Trials - IWMPRAISE."
- Gaviglio, Christophe. 2018a. *Entretien Des Sols*. <https://www.youtube.com/watch?v=L5CjIA0CKd8&t=59s>.
- . 2018b. "La Robotique En Viticulture." Institut Français de La Vigne et Du Vin. 2018. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/la-robotique-en-viticulture/>.
- . 2018c. "La Robototique En Viticulture." Institut Français de La Vigne et Du Vin. 2018. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/la-robotique-en-viticulture/>.
- . 2020. "Aternative Aux Herbicides." In , edited by IFV.
- Gaviglio, Christophe, and Xavier Delpuech. 2019. "Pailler Sous Le Rang En Vigne." GECO. 2019.

[https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fPaillage\\_Sous\\_Le\\_Rang\\_En\\_Vigne](https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fPaillage_Sous_Le_Rang_En_Vigne).

Gayraud, M., and Ph. Delva. 2015. "Utiliser Le Concept ESR Pour Concevoir Son Système." *Ecophytopic*. 2015. <https://ecophytopic.fr/pic/concevoir-son-systeme/utiliser-le-concept-esr-pour-concevoir-son-systeme>.

Gayraud, M., and Ph. Delval. 2017. "Utiliser Des Stimulateurs de Défenses Naturelles." *Ecophytopic*. 2017. <https://ecophytopic.fr/pic/protoger/utiliser-des-stimulateurs-de-defenses-naturelles>.

Ghiglieno, Isabella. 2020. "Viticulture Innovative Soil Organic Matter Management : Variable Rate Distribution System and Monitoring of the Impacts."

Goinere, Colette. 2020. "Ce Vigneron Arrête La Confusion Sexuelle Face Aux Vers de La Grappe." *Vitisphère*. 2020. <https://www.vitisphere.com/actualite-92342-Ce-vigneron-arrete-la-confusion-sexuelle-face-aux-vers-de-la-grappe.htm>.

Gontier, Laure. 2021. "La Matière Organique." *Institut Français de La Vigne et Du Vin*. 2021. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/la-matiere-organique/>.

Gontier, Laure, and Jean-Yves Cahurel. 2021. "L'azote En Viticulture." *Institut Français de La Vigne et Du Vin*. 2021. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/lazote-en-viticulture/>.

Gontier, Laure, and Xavier Delpuech. 2019. "Mini-Guide Pratique de l'enherbement Sous Le Rang En Viticulture."

Gontier, Laure, and Christophe Gaviglio. 2018. "Mise En Œuvre de Paillages Sous Le Rang Comme Solution de Lutte Contre Les Adventices En Viticulture." *Institut Français de La Vigne et Du Vin*.

Gril, J.-J., Nadia Carluer, and Guy Le Hénaff. 2011. "Buffer Zones, a Way to Control Water Pollution by Pesticides on Catchment Areas." *Techniques - Sciences - Methodes.*, 20–32.

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#>.

Herbin, C. 2011. "Confusion Sexuelle." In *CEPVITI Co-Conception de Systèmes Viticoles Économiques En Produits Phytosanitaires*.

IFV. 2019. "Les Engrais Verts En Viticulture." 2019.

<https://www.vignevin.com/publications/fiches-pratiques/engrais-verts-en-viticulture/>.

INRA. 2018. "Les Enquêtes de l'INRA Pour Le Biocontrôle."

———. 2019. "Stocker Du Carbone Dans Les Sols Français , Quel Potentiel Au Regard de l'objectif 4 Pour 1000 et à Quel Coût?" *Synthèse Du Rapport d'étude, INRA (France)*, no. August: 114.

INRAE. 2021. "Enherbement Maîtrisé." *Ephytia*. 2021. <http://ephytia.inra.fr/fr/C/24091/Vigne-Enherbement-maitrise>.

Ivaldi, Marion. 2014. "Testez Vos Connaissances Sur Les Engrais Verts." 2014. <https://www.reussir.fr/vigne/testez-vos-connaissances-sur-les-engrais-verts>.

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.

Jacquet, F, N Delame, J Lozano-Vita, X Reboud, and C Huyghe. 2019. "Alternatives Au Glyphosate En Viticulture : Évaluation Économique Des Pratiques de Désherbage" 3: 1–25.

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.

KERNER, Sébastien. n.d. "BILAN CARBONE® : DE LA VIGNE A LA BOUTEILLE."

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>.

"L'enherbement de La Vigne En 10 Questions Réponses." 2020. Institut Français de La Vigne et Du Vin. 2020. <https://www.vignevin.com/article/lenherbement-de-la-vigne/>.

"La Bataille Des Robots Viticoles Est Lancée ?" 2018. Techniloire. 2018. <https://techniloire.com/actualite/la-bataille-des-robots-viticoles-est-lancee>.

"La Pulvérisation Confinée Vitibot." 2021. Vitibot. 2021. <https://vitibot.fr/outils/pulverisation-confinee-viticulture/>.

Lang, Carina P., Nikolaus Merkt, Christoph Martin Geilfus, Simone Graeff-Hönninger, Judy Simon, Heinz Rennenberg, and Christian Zörb. 2019. "Interaction between Grapevines and Trees: Effects on Water Relations, Nitrogen Nutrition, and Wine." *Archives of Agronomy*

- and Soil Science* 65 (2): 224–39. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1493197>.
- López-Urrea, R., J.M. Sánchez, A. Montoro, F. Mañas, and D.S. Intrigliolo. 2020. “Effect of Using Pruning Waste as an Organic Mulching on a Drip-Irrigated Vineyard Evapotranspiration under a Semi-Arid Climate.” *Agricultural and Forest Meteorology* 291.
- Lorriette, Julien. 2019. “La Viticulture de Précision État Des Lieux et Outils d’avenir.” AgroTIC. 2019. <https://www.agrotic.org/veille/la-viticulture-de-precision-etat-des-lieux-et-outils-davenir/>.
- 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>.
- Manzone, Marco, Mattia Demeneghi, Paolo Marucco, Marco Grella, and Paolo Balsari. 2020. “Technical Solutions for Under-Row Weed Control in Vineyards: Efficacy, Costs and Environmental Aspects Analysis.” *Journal of Agricultural Engineering* 51 (1): 36–42. <https://doi.org/10.4081/jae.2020.991>.
- Marguerit, Elisa, Jean-pascal Tandonnet, Bastien Golard, Anthony Peccoux, and Kees Van Leeuwen. 2011. “Le Porte-Greffe, Outil Original et Pertinent d’ Adaptation Au Changement Climatique.” In *Journée Technique Du Conseil Interprofessionnel Du Vin de Bordeaux (CIVB)*, 4.
- MATRAY, Bertille. 2019. “Situational Analysis of Green Manure Practices Implemented in Gaillac Vineyard.”
- Matthews, J.B. Robin. 2018. “Annex I: Glossary.” In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, et al., IPCC, 148:148–62.
- Meyer, Antoine. 2018. “Biocontrol Industry: What, Who, Why,...” In , edited by IBMA, 46. Paris.
- Montigaud, Isabelle. 2020. “Déterminer Avec Précision La Date et La Dose Des Traitements En Vigne Avec Decitrait.” Réussir Vigne. 2020. <https://www.reussir.fr/vigne/determiner-avec-precision-la-date-et-la-dose-des-traitements>.
- Naïo Technologies. 2016. “Les Avantages Pratiques Du Binage Robotique.” 2016.
- Navarro, Alejandra, Rita Puig, Eylem Kiliç, Sophie Penavayre, and Pere Fullana-i-Palmer. 2017. “Eco-Innovation and Benchmarking of Carbon Footprint Data for Vineyards and Wineries in Spain and France.” *Journal of Cleaner Production* 142: 1661–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.124>.

- Nistor, Eleonora, Alina Georgeta Dobrei, Alin Dobrei, and Narasinha Shurpali. 2019. "GHG Emissions and Mitigation in Romanian Vineyards." In *Greenhouse Gas Emissions*, 33–56. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3272-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3272-2_4).
- Novara, Agata, Valeria Favara, Amelia Novara, Nicola Francesca, Tanino Santangelo, Pietro Columba, Stefania Chironi, Marzia Ingrassia, and Luciano Gristina. 2020. "Soil Carbon Budget Account for the Sustainability Improvement of a Mediterranean Vineyard Area." *Agronomy* 10 (3). <https://doi.org/10.3390/agronomy10030336>.
- OIV. 2020. "2020 Wine Production - OIV First Estimates." *International Organisation of Vine and Wine*.
- Ortuani, Bianca, Arianna Facchi, Alice Mayer, Davide Bianchi, Andrea Bianchi, and Lucio Brancadoro. 2019. "Assessing the Effectiveness of Variable-Rate Drip Irrigation on Water Use Efficiency in a Vineyard in Northern Italy." *Water (Switzerland)* 11 (10): 1–18. <https://doi.org/10.3390/w11101964>.
- Paysan, Jean-Christophe, and Thierry Dufourcq. 2018. "Irrigation de La Vigne." Institut Français de La Vigne et Du Vin. 2018. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/irrigation-de-la-vigne/>.
- 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).
- Pinto, Ramos. 2017. "Rapport D'Analyse Des Coûts De Production Sur Les Cepages Résistants." <https://www.vinovert.eu/images/publications/Analyse-couts-cepages-resistants.pdf>.
- "Pratiquer l'enherbement Total En Vigne." n.d. GECO. [https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252Fconcept%252FPratiquer\\_L\\_Enherbement\\_Total\\_En\\_Vigne](https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252Fconcept%252FPratiquer_L_Enherbement_Total_En_Vigne).
- 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>.
- 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-contrôle-ni-certifié-217-165793.html](https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique-culturale/article/tolerance-au-stress-hydrique-un-aspect-pas-encore-contr%C3%B4le-ni-certifi%C3%A9-217-165793.html).
- Raynal, Marc. 2019. "Moduler Les Doses de Produits Phytosanitaires En Viticulture : Quels Travaux En Cours et Quelles Perspectives ?" In *Numérique et Modulation Intraparcellaire*. [https://www.youtube.com/watch?v=474ZSO\\_Aorg](https://www.youtube.com/watch?v=474ZSO_Aorg).

- Román, Carla, Jordi Llorens, Asier Uribeetxebarria, Ricardo Sanz, Santiago Planas, and Jaume Arnó. 2020. "Spatially Variable Pesticide Application in Vineyards: Part II, Field Comparison of Uniform and Map-Based Variable Dose Treatments." *Biosystems Engineering* 195 (July): 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.04.013>.
- 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>.
- Rousseau, Jacques, Gérard Auge, Blaire Leclerc, Olivier Mallet, Jean-Michel Rieux, Michel Guerber, Eric L'HELGOUALCH, and François WARLOP. n.d. "Choix Des Amendements Organiques En Viticulture." *Techn'ITAB Viticulture* 525 (1): 4.
- Sawyer, Geoff, Chris Oligschlaeger, and Nikolay Khabarov. 2021. "Making Wine in France."
- Simonovici, Maxime. 2019. "Enquête Pratiques Phytosanitaires En Viticulture En 2016: Nombre de Traitements et Indicateurs de Fréquence de Traitement." *Agreste Les Dossiers*, no. 2019–2: 50. [www.agreste.agriculture.gouv.fr](http://www.agreste.agriculture.gouv.fr).
- 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>.
- 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](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3466&docType=pdf).
- Thiéry, Denis, Lionel Delbac, and E T Laurence. 2019. "La Confusion Sexuelle, Une Alternative Aux Insecticides." *Phytoma* 728: 45–50.
- Thromas, Marie, Pierre Bompard, and Simon Giuliano. 2018. "Engrais Vert : Définition." *Dictionnaire d'Agroécologie*. 2018. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/engrais-vert/>.
- Trambouze, W., and N. Goma-Fortin. 2013. "Agroforesterie Viticole : Résultats de 11 Ans d'étude Sur La Production et La Vigueur Des Vignes." *18 Èmes Journées Internationales de Viticulture GiESCO* 0: 510–13.
- Varray, S., and C. Le Roux. 2012. "Guide Pratique Des Bandes Fleuries En Viticulture. Synthèse



Des Travaux En Beaujolais 2004-2012.”  
[https://reseaunature.natagora.be/fileadmin/Reseau\\_nature/PDFs/Ca\\_passe\\_par\\_vous\\_48.pdf](https://reseaunature.natagora.be/fileadmin/Reseau_nature/PDFs/Ca_passe_par_vous_48.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.

Weenat. 2020. “Communication Personnelle.”

Winetwork. 2020. “L’application de Trichoderma En Europe Pour Limiter Les Maladies Du Bois de La Vigne.” <https://www.vignevin-occitanie.com/wp-content/uploads/2018/10/3-Article-technique-trichoderma.pdf>.

Zanzotti, Roberto, and Enzo Mescalchin. 2019. “Green Manure Effects on Inorganic Nitrogen Dynamics in Soil and Its Accumulation in Grape Must.” Edited by S. Poni. *BIO Web of Conferences* 13 (04010): 4. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191304010>.

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

Zébic, Olivier. 2016. *Guide Pratique de La Viticulture Innovante*. Edited by DUNOD.

## Table des tableaux

Tableau 1 - Pourcentage d'efficacité de différents paillages sur les adventices .....	13
Tableau 2 - Temps de travail par hectare selon différents paillages ou en désherbage chimique .....	14
Tableau 3- Coût estimé de différents types de paillage .....	15
Tableau 4 - Consommation d'énergie non renouvelable et émissions de CO2 lors d'une gestion de l'inter-ceps avec une bâche biodégradable ou par un travail du sol nu, source : Agrobiofilm Consortium 2013.....	15
Tableau 5 - Nombre de passages moyen en désherbage mécanique seul, source : Jacquet et al. 2019 .....	38
Tableau 6 - Nombre de passages moyen en désherbage mixte, source : Jacquet et al. 2019 ..	39
Tableau 7 - Temps de travail supplémentaire en désherbage mécanique par rapport à un désherbage chimique (h/ha), source : Jacquet et al. 2019.....	39
Tableau 8 - Temps de travail supplémentaire en désherbage mixte par rapport à un désherbage chimique (h/ha), source : Jacquet et al. 2019 .....	40
Tableau 9 - Coût de production supplémentaire en désherbage mécanique par rapport à un désherbage chimique (€/ha), source : Jacquet et al. 2019.....	40
Tableau 10 - Coût de production supplémentaire en désherbage mixte par rapport à un désherbage chimique (€/ha), source : Jacquet et al. 2019.....	40
Tableau 11 - Effets des pratiques étudiées sur l'utilisation des pesticides.....	57
Tableau 12 - Effets des pratiques étudiées sur la consommation d'engrais et sur le rendement .....	58
Tableau 13 - Effets des pratiques étudiées sur la consommation d'eau et sur le rendement ...	59
Tableau 14 - Effets des pratiques étudiées sur les rendements, le temps de travail et le coût de production .....	61
Tableau 15 - Effets des pratiques étudiées sur l'atténuation du changement climatique et sur les composantes environnementales .....	64
Tableau 16 - Synthèse des pratiques les plus bénéfiques sur l'efficacité d'utilisation des intrants, sur les conditions socio-économiques et sur les performances environnementales et climatiques .....	66

## Table des figures

Figure 1 - Surfaces viticoles européennes en 2015 (% de la surface agricole utile totale), source : Eurostat (vit_t1) .....	1
Figure 2 – Les pratiques étudiées et les intrants dont elles affectent l'usage.....	6
Figure 3 - Les cinq niveaux de l'agriculture digitale .....	26
Figure 4 - Pourcentage d'utilisation des outils de modulation des doses selon les types de vignoble, source : Ghiglieno 2020 .....	35
Figure 5 - Émissions de GES en fonction du type d'apport azoté, source : Novara et al. (2020) .....	54

## Liste des sigles et acronymes

ACV : Analyse de cycle de vie

AOP : Appellation d'origine protégée

C : Carbone

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

CO<sub>2</sub>e : Equivalent CO<sub>2</sub>

ESR :Efficience – Substitution – Re-conception

F2F : Stratégie de la ferme à la fourchette

FBA : Fixation biologique de l'azote

Ha : Hectare

IFT : Indice de fréquence des traitements

LULUCF: Land use, land change and forestry

Mhl :million d'hectolitre

MO : Matières organiques

N : Azote

N<sub>2</sub>O : Protoxyde d'azote

NH<sub>3</sub> : Ammoniac

OAD : Outil d'aide à la décision

SDN : Stimulateur de défenses naturelles

SDP : Stimulateur de défenses des plantes

VATE : Valeur agronomique, technologique et environnementale

VRI : Variable rate irrigation – Irrigation à débit variable

