



**HAL**  
open science

# Évaluation pluriannuelle de l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais

Daniel Pasquel

► **To cite this version:**

Daniel Pasquel. Évaluation pluriannuelle de l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais. Amélioration des plantes. 2020. dumas-03641698

**HAL Id: dumas-03641698**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03641698v1>**

Submitted on 14 Apr 2022

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

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

## Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome  
Option Production Végétale Durable

# Evaluation pluriannuelle de l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais



Par Daniel PASQUEL

Année de soutenance : 2020  
Organisme d'accueil : UMR ABSys – INRAE



# Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome  
Option Production Végétale Durable

## Evaluation pluriannuelle de l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais



Par Daniel PASQUEL

Année de soutenance : 2020

**Mémoire préparé sous la direction de :** Léo GARCIA

**Organisme d'accueil :**  
UMR ABSys – INRAE

**Maître de stage :**  
Aurélie METAY

**En collaboration avec :**  
Lorelei CAZENAVE et David KAPFER  
(CA 33)

**Présenté le :** 11 septembre 2020

**Devant le jury :**  
Brigitte BRUNEL (Présidente du jury)  
Léo GARCIA (Tuteur)  
Christian GARY (Rapporteur)

# Résumé

**Titre : Evaluation pluriannuelle de l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais.**

Le projet VERTIGO a pour but de promouvoir la mise en place de gestion durable du sol au sein des vignobles bordelais. Ce mémoire de fin d'étude, réalisé dans le cadre de ce projet, a pour but d'évaluer l'effet de la mise en place de pratiques de gestion durable du sol (cultures de service semées dans l'inter-rang, amendement organique, tonte extensive) sur les performances viticoles, à travers 8 variables : le rendement, le poids de bois de taille, le poids pétiolaire, les poids des baies, l'azote assimilable et les concentrations en polyphénols, en anthocyane et en sucre. Les effets de ces pratiques durables sont étudiés sur 5 ans en comparaison avec les pratiques habituelles des viticulteurs sur 14 parcelles. La mise en place des pratiques alternatives n'a pas d'effet significatif sur les performances viticoles. Les rendements sont néanmoins plus stables avec la mise en place des pratiques alternatives. Les facteurs pédoclimatiques, très variables à l'échelle du vignoble bordelais, sont les principaux facteurs explicatifs du rendement, de la vigueur et des caractéristiques des baies (respectivement 84%, 71% et 75%). Toutefois, la mise en place de pratiques alternatives n'a pas d'effet sur les performances viticoles lorsqu'on évalue ces performances au sein de parcelles aux caractéristiques pédoclimatiques homogènes. Enfin, les opérations culturales mises en œuvre pour les pratiques alternatives et pour les pratiques habituelles des viticulteurs étant différentes d'une parcelle à l'autre, nous avons complété l'analyse en regroupant les parcelles aux itinéraires techniques similaires. L'analyse des performances au sein de ces groupes a montré que la mise en place de désherbages mécaniques à fréquence élevée (3 à 4 fois par an) sur le rang et l'inter-rang avec une forte densité de plantation peut augmenter le risque de perdre du rendement et de la vigueur. La mise en place de cultures de services permet d'obtenir de nombreux services écosystémiques dont les principaux sont la couverture du sol et la restitution de minéraux. Le temps de travail est en moyenne 20% plus élevé que le recours aux pratiques habituelles, ce qui peut être envisageable pour les parcelles où le temps de travail est faible. Ces résultats sont en faveur de l'adoption sur un plan technique de ces pratiques alternatives par les viticulteurs bordelais pour choisir une gestion plus durable des vignobles. Pour la suite du projet, un plus grand nombre de répétitions avec des mesures au pieds, notamment pour le rendement et les poids de bois de taille, permettrait d'obtenir des résultats plus robustes concernant l'effet de ces pratiques alternatives sur les performances viticoles.

**Mots clefs :**

durabilité des pratiques, viticulture, cultures de services, évaluation de système, agroécologie

Pour citer cet ouvrage : Pasquel, Daniel, 2020. Evaluation pluriannuelle de l'effet de la mise place de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais. Mémoire d'Ingénieur Agronome, option Production Végétale Durable, L'institut Agro - Montpellier SupAgro. 73 pages.

# Abstract

**Title : Multi-year assessment of the effect of sustainable soil management practices on viticultural performances in the Bordeaux vineyards.**

The VERTIGO project aims to promote the sustainable soil management implementation in Bordeaux vineyards. This work, in connection with this project, aims to assess the effect of sustainable soil management practices implementation (service cover sown in the inter-row, organic amendment, extensive mowing) on viticultural performances, through 8 variables : yield, pruning weight, petiolar weight, berry weight, assimilable nitrogen and concentrations of polyphenols, anthocyanin and sugar. The sustainable practice effects are studied over 5 years in comparison with the usual practices of winegrowers on 14 plots. Alternative practice implementation has no significant effect on viticultural performances. Yields are nevertheless more stable with alternative practice implementation. The pedoclimatic factors, which vary greatly throughout the Bordeaux vineyard, are the main factors explaining the yield, vigor and berry characteristics (84%, 71% and 75% respectively). However, the alternative practices implementation has no effect on viticultural performances when these performances are evaluated within plots with homogeneous pedoclimatic characteristics. Finally, as the cultural operations implemented for the alternative practices and the winegrower's usual practices differed from one plot to another, we completed the analysis by grouping plot with similar technical itineraries. Performance analysis within these groups showed that heavy mechanical weeding implementation (3 to 4 times per year) on rows and inter-rows with a high planting density can increase the losing yield and vigor risk. Service crop establishment provides many ecosystem services, the main ones being coverage and mineral restitution. Working hours are on average 20% higher than usual practices, which may be feasible for plots with low working time. These results are in favor of alternative practices technical adoption by Bordeaux winegrowers to choose a more sustainable vineyard management. For the project remainder, a greater replication number with measurements by foot, particularly for yield and pruning weights, would allow more robust results to be obtained regarding the effect of these alternative practices on the viticultural performances.

**Key words :**

practices sustainability, viticulture, service crops, system assessment, agroecology

# Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier ma maîtresse de stage, Aurélie Metay, pour son encadrement tout au long de mon stage. Un grand merci pour tes nombreux conseils, commentaires, relectures et tout ce temps que tu m'as accordé pour la réalisation de ce mémoire. Que ce soit en visio ou en présentiel, tu as toujours su te rendre disponible pour moi. Merci aussi pour l'enseignement que nous a dispensé cette année en PVD et pour m'avoir, à plusieurs reprises, aidé à m'orienter pour la suite de mon parcours.

Je tiens à remercier Lorelei Cazenave et David Kapfer pour leurs nombreux conseils dans la réalisation du projet. Sans vous de nombreux points n'auraient pas pu être réalisés dans ce mémoire. Dommage que nous n'ayons pas pu nous rencontrer physiquement à cause du contexte sanitaire, peut être qu'un jour je viendrais faire un tour du côté des vignobles bordelais !

Je tiens à remercier mon tuteur, Léo Garcia, pour son temps passer aux relectures de mon mémoire. Merci pour ta disponibilité et tes nombreux conseils qui m'ont permis d'améliorer ma production.

Je tiens aussi à remercier mes collègues de l'UMR ABSys, votre bonne humeur était vraiment très appréciable au cours des nombreux repas passés ensemble à la cantine. Je remercie tout particulièrement mes collègues stagiaires : Lysa, Elsa, Isabelle et Taiza pour le temps partagé au bureau (dans la meilleure salle des stagiaires) mais aussi en dehors (jusqu'à tard parfois). J'espère, mais je sais, qu'on se reverra et en plus vous savez où me trouver pour les années à venir !

Je tiens aussi à remercier mes colocataires de l'ambiance Lise, Julie et Manon pour tous les bons moments passés ensemble et tous ce qu'on a pu partager ! Même si ce fut plus court que prévu, cette colocation était vraiment géniale, remplie de bon petits plats, de plantes, d'architectes d'intérieur en herbe et de rencontres en tout genre.

Un dernier remerciement pour ma promo 016, merci pour ces années passées à SupAgro qui ont vraiment changé ma vie, vivement les prochaines retrouvailles. Et merci pour mes collègues de PVD Laura, Nicolas, Kelvin, Lise, Sarah, Manon et Sophie pour cette fabuleuse année, les projets de groupe, Montargis, les gâteaux, et j'en passe ... mais aussi pour les moments de retrouvailles mémorables à Mtp !

# Sommaire

Remerciements.....	6
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	11
Sigles et acronymes.....	13
Introduction.....	14
I. Contexte et état de l'art.....	15
I.1. Performances viticoles et nutrition de la vigne.....	15
I.1.1. Elaboration du rendement de la vigne et vigueur.....	15
I.1.2. Caractéristiques et qualité des baies.....	16
I.1.3. Niveaux de nutrition minérale et analyse pétiolaire.....	17
I.2. Gestion durable des sols viticoles.....	18
I.2.1. Enjeux de la gestion durable des sols.....	18
I.2.2. Problématique de gestion durable des sols viticoles bordelais.....	18
I.2.3. Leviers pour la gestion durable des sols viticoles.....	19
I.3. L'enherbement, levier pour la gestion durable des sols viticoles.....	19
I.3.1. Services rendus aux sols viticoles.....	19
I.3.1.1. Amélioration des propriétés physiques du sol.....	19
I.3.1.2. Amélioration des propriétés chimiques et biologiques du sol.....	20
I.3.2. Interactions entre vigne et cultures de services.....	20
I.3.2.1. Interaction avec la ressource en eau.....	20
I.3.2.2. Interaction avec les ressources minérales du sol.....	21
I.3.2.3. Interaction avec les bio-agresseurs.....	21
I.3.3. Compromis entre services et dyservices des cultures de services.....	22
I.4. Pratiques de gestion durables des sols dans le bordelais.....	22
I.5. Contexte du projet VERTIGO dans le bassin viticole bordelais.....	22
I.6. Problématique et démarche.....	23
II. Matériels et méthodes.....	24
II.1. Description du dispositif expérimental.....	24
II.1.1. Localisation des parcelles commerciales étudiées.....	24
II.1.2. Caractéristiques spatiales du dispositif sur les parcelles.....	24
II.1.3. Caractérisation des pratiques mises en place sur les dispositifs.....	25
II.1.3.1. Interventions culturales des traitements.....	25
II.1.3.2. Choix des espèces semées sur les PA en culture de service.....	26
II.1.4. Caractérisation pédoclimatique des parcelles.....	26
II.2. Evaluation des performances et mesure des variables suivies.....	26
II.2.1. Mesure des variables des performances viticoles.....	26
II.2.2. Caractérisation des couverts et mesures réalisées.....	28
II.2.3. Estimation de l'état hydrique de la vigne.....	28
II.3. Stratégie d'analyses de données.....	28
II.3.1. Définitions des indicateurs calculés à partir de variables mesurées.....	29
II.3.1.1. Indicateurs pour les performances viticoles.....	29
II.3.1.2. Indicateurs pour l'évaluation des services fournis par les CS.....	29
II.3.2. Caractérisation de la variation des performances viticoles et leurs déterminants.....	29
II.3.1. Réalisation des typologies de parcelles.....	30
III. Résultats.....	32
III.1. Analyse des performances viticoles.....	32



III.1.1.	Gammes de valeurs des performances viticoles .....	32
III.1.2.	Rendement et poids de bois de taille au bout de 5 années d'expérimentation .....	32
III.1.3.	Variabilité des performances viticoles entre les traitements.....	33
III.1.4.	Effet du traitement, de la parcelle et de l'année sur les variations de $\Delta_{performances}$ sur l'ensemble des années et contribution relative de chaque facteur .....	33
III.1.5.	L'effet du traitement sur les performances viticoles en milieux pédoclimatiques homogènes .....	34
III.1.5.1.	Construction des groupes pédoclimatiques homogènes .....	34
III.1.5.2.	Effet des traitements au sein des GPC .....	35
III.1.6.	L'effet du traitement sur les $\Delta_{performances}$ pour des pratiques culturales homogènes .....	36
III.1.6.1.	Construction des groupes de pratiques culturales homogènes .....	36
III.1.6.1.	Effet des traitements au sein des GITK .....	38
III.2.	Analyse des facteurs pouvant être limitants pour les performances viticoles entre les PA et les Témoins.....	38
III.2.1.	Comparaison de la nutrition minérale entre les traitements PA et Témoins.....	38
III.2.2.	Caractérisation du niveau de contrainte hydrique du bassin et des traitements .....	39
III.2.3.	Conséquence de la croissance des couverts sur les performances viticoles.....	40
III.3.	Evaluation technico-environnementale de la mise en œuvre des pratiques alternatives .....	41
III.3.1.	Evaluation de la charge de travail sur les différents traitements .....	41
III.3.2.	Evaluation des services fournis par la mise en place des pratiques alternatives .....	41
III.3.2.1.	Service engrais vert des CV.....	41
III.3.2.2.	Service d'entretien du stock de MO.....	42
III.3.2.3.	Service de couverture du sol .....	43
III.4.	Bilan des résultats.....	43
IV.	Discussion .....	44
IV.1.	Discussion des résultats .....	44
IV.1.1.	Les PA ne modifient pas le niveau des performances viticoles .....	44
IV.1.2.	Les PA fournissent des services à la parcelle viticole.....	44
IV.1.2.1.	Service engrais vert des CS.....	44
IV.1.2.2.	Entretien de la qualité des sols par les CS.....	45
IV.1.3.	Le temps de travail des PA est-il envisageable ? .....	46
IV.1.4.	Représentativité des groupes de parcelles homogènes sur lesquels l'effet de la mise en place des PA a été testée .....	46
IV.1.4.1.	Représentativité des groupes homogènes pédoclimatiques au sein du vignoble bordelais .....	46
IV.1.4.2.	Représentativités des groupes homogènes d'ITK au sein du vignoble bordelais.....	47
IV.2.	Discussion des méthodes .....	47
IV.2.1.	Différences entre les traitements de gestion de parcelle .....	47
IV.2.2.	Modélisation du niveau de contrainte hydrique de la vigne.....	48
IV.2.3.	Faible puissance statistique <i>a posteriori</i> pour évaluer l'effet du traitement .....	48
IV.3.	Perspectives .....	48
IV.3.1.	Augmenter la puissance statistique : analyse <i>a priori</i> de la puissance .....	48
IV.3.2.	Adoption des pratiques de gestion durable du sol par les agriculteurs.....	49
V.	Conclusion.....	50
	Bibliographie .....	51
	Liste des annexes.....	56
	Annexes.....	57

## Liste des figures

Figure 1 : Décomposition du produit du rendement annuel de la vigne – Adapté de Guilpart (2014).	15
Figure 2 : Diminution du rendement potentiel maximum au cours du développement de la vigne – Adapté de Guilpart (2014).....	16
Figure 3 : Croissance des baies de la vigne – Issu de Coombe et McCarthy (2000). ....	17
Figure 4 : Services et dyservices attendus des CS en vignoble – Issu de Garcia et al. (2018). ....	19
Figure 5 : Schéma conceptuel de la démarche d'analyse de données suivie au cours du mémoire. Ce schéma conceptuel a été produit sur la base de l'état de l'art et des variables mesurées lors de l'expérimentation. Il a été construit selon la démarche de modélisation conceptuelle formalisée par Lamanda et al. (2012). ....	23
Figure 6 : Localisation et abréviations des 14 parcelles étudiées dans le réseau VERTIGO. Les parcelles sont localisées sur différents vignobles bordelais, en orange : Blayais, en rouge : Médoc, en vert : Libournais, en bleu : Entre-deux-Mers, en violet : Graves, en jaune : Sauternais et en gris : vignoble de Bergerac. ....	24
Figure 7 : Dispositif expérimental mis en place sur les parcelles. ....	24
Figure 8 : Schéma récapitulatif des étapes de création des typologies pédoclimatiques et d'ITK. ....	31
Figure 9 : $\Delta_{\text{rendement}}$ (a) et $\Delta_{\text{poids.bois.taille}}$ (b) de 2019 en fonction des traitements mise ne place sur les parcelles. Les différences entre moyenne qui partagent une lettre ne sont pas significatives (test de Tukey).....	32
Figure 10 : Modèles linéaires sélectionnés pour l'explication des variations des $\Delta_{\text{performances}}$ et valeurs brutes des performances viticoles en fonction du traitement, de la parcelle, de l'année et de leurs interactions et valeurs des contributions relatives issues de l'analyse de dominance pour chaque facteur des modèles linéaires sélectionnés. Les interactions entre variables sont symbolisées par « : ». La contribution représente le pourcentage d'explication du facteur par rapport au $R^2$ global du modèle linéaire sélectionné. $R^2$ correspond au pourcentage d'explication des facteurs du modèle sélectionné pour le $\Delta_{\text{performance}}$ correspondant. ....	34
Figure 11 : a. Biplot des individus et des modalités des variables de l'ACM réalisée sur 14 parcelles de 2014 à 2019 (72 individus) et 5 variables caractérisant le contexte pédoclimatique des parcelles. Les individus sont représentés en bleu. Les variables sont représentées selon leur contribution à la construction des axes, des rouges les plus contributrices au jaunes les moins contributrices. b. GPC obtenus suite à la CAH. Rouge : GPC_1, Vert : GPC_2 et Bleu : GPC_3. ....	34
Figure 12 : a. Graphique des 7 variables de l'ACP caractérisant les ITK mise en place réalisée sur 12 parcelles sur les ITK de 2018 (24 individus), les variables sont représentées selon leur contribution à la construction des axes, du rouge les plus contributrices au jaune les moins contributrices. freq_meca : fréquence du désherbage mécanique, freq_tonte : fréquence de la tonte des couverts, freq_chim : fréquence du désherbage chimique, R : rang, IR : inter-rang et MS_CS : masse de MS des CS. b. Graphique des individus. c. GITK obtenus suite à la CAH. Rouge : GITK_1, Vert : GITK_2, Bleu : GITK_3 et Violet : GITK_4. ....	36

Figure 13 : Analyses pétiolaires pour l'ensemble des parcelles et des années d'étude en fonction du traitement pour la teneur en azote (a), en phosphore (b), en potassium (c), en calcium (d) et en magnésium (e) en mg/g entre 2015 et 2019. Les lignes vertes en pointillés réfèrent aux seuils issus d'études bordelaises (Delas, 2010) et les lignes oranges en pointillés réfèrent aux seuils moyens issus d'études internationales (Benito et al., 2013; Dami, 2005; Dominguez et al., 2015).....38

Figure 14 : FTSW modélisée avec WaLIS sur la parcelle Itb (a) et la parcelle labr (b) en 2016 pour les traitements PA (courbe rouge) et Témoin (courbe bleue). Les seuils correspondent aux seuils de stress hydriques issus de Pellegrino et al. (2006), en vert : situation de satisfaction des besoins hydriques de la vigne, en orange : situation de stress modéré pour la vigne, en rouge : situation de stress intense pour la vigne.....39

Figure 15 : Matière sèche en T/ha produite par les couverts sur les PA et les Témoins. PA\_CS\_2015\_2019 : CS sur les PA de 2015 à 2019, PA\_CS\_2020 : CS sur les PA en 2020, PA\_spontane\_2020 : couverts spontanés sur les PA en 2020, T\_spontane\_2020 : couverts spontanés sur les Témoins en 2020.....40

Figure 16 : Temps de travail en h/ha en fonction du traitement pour chaque parcelle pour l'année viticole 2018 (de l'implantation de la CS en 2017 à sa destruction en 2018). Sont représentés en vert le temps des interventions culturales appliquées sur la parcelle entière (temps égal sur les 2 traitements), en rouge le temps des interventions culturales appliquées uniquement sur le traitement PA et en bleu le temps des interventions culturales appliquées uniquement sur le traitement Témoin.....41

Figure 17 : Restitution estimée en azote, phosphore et potassium des CS sur les PA de 2015 à 2020. ....41

Figure 18 : Quantité de carbone du sol sur le traitement PA de chaque parcelle en 2015 (rouge), en 2020 avec restitution des sarments de vigne et de la biomasse des CS détruits (vert), en 2020 avec restitution des sarments de vigne (bleu), en 2020 avec restitution de la biomasse des CS détruits (jaune) et en 2020 sans aucune restitution de MO (gris). ....42

Figure 19 : Pourcentage de sol nu sur les traitements PA et Témoins sur 2018 et 2019. Les losanges correspondent aux moyennes sur les traitements correspondant. ....43

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Seuils bas et seuils hauts pour l'interprétation des analyses pétiolaires des éléments majeurs et secondaires au stade véraison sur des références bordelaises (Delas, 2010) et internationales (Benito et al., 2013; Dami, 2005; Dominguez et al., 2015). Ces seuils sont issus des moyennes des valeurs de seuils basses et hautes de différentes études, les valeurs sont reprises en Annexe 1.....	18
Tableau 2 : Interventions culturales mises en place par parcelle sur les traitements Témoins et PA basées sur le suivi de 2018. Les fréquences indiquées sont des fréquences annuelles. La MS des CS est issue de la moyenne des masses produites respectivement par parcelle entre 2015 et 2019. IR : Inter-Rang, R : Rang.....	25
Tableau 3 : Espèces semées comme CS sur les traitements PA afin de répondre aux problèmes liés au sol identifiés sur les parcelles d'étude.....	26
Tableau 4 : Récapitulatif des variables mesurées et calculées représentatives des performances viticoles pour mener l'ensemble des analyses menées dans le mémoire. Les années sont les années où les mesures des variables ont été effectuées sur les parcelles correspondantes.....	27
Tableau 5 : Récapitulatif des performances viticoles analysées et méthodes d'analyse employées....	30
Tableau 6 : Variables caractérisant le contexte climatique des parcelles pour réaliser l'ACM sur les caractéristiques climatiques : le cumul des précipitations entre octobre et mars, le cumul des précipitations entre avril et septembre et l'indice héliothermique d'Huglin (IH). Des classes sont associées à ces variables pour réaliser l'analyse. ....	30
Tableau 7 : Variables caractérisant le contexte pédologique des parcelles utilisées pour réaliser l'ACM sur les caractéristiques pédologiques : le taux de MO, le pH, le rapport C:N, la capacité de rétention et le niveaux de minéraux du sol. Des classes sont associées à ces variables pour réaliser l'analyse. ....	31
Tableau 8 : Gamme de variation des valeurs des performances viticoles. CV : Coefficient de variation. CV est défini comme le rapport de l'écart-type et de la moyenne. Vert : $CV < 0.25$ , Jaune : $0.25 > CV > 0.50$ , Orange : $CV > 0.50$ .....	32
Tableau 9 : Résultats des tests de comparaison de variances de Fisher pour les performances viticoles brutes entre les PA et les Témoins. La p-value accompagnée d'étoile (*) indique la significativité du résultat («*» signifie $p\text{-value} < 0.05$ ). Les variances des performances entre les PA et les Témoins sont significativement différentes si $p\text{-value} < 0.05$ .....	33
Tableau 10 : Caractérisation des groupes de parcelles obtenus par CAH à partir de 14 parcelles sur 2 ou 5 années (soit 58 individus) suivant 5 caractéristiques pédoclimatiques. Les moyennes et coefficients de variation des performances viticoles au sein des GPC sont présentées. GPC : Groupe PédoClimatique. Sur fond vert sont représentées les variables avec la plus grande contribution pour la structuration de l'ACM. Vert : $CV < 0.25$ , Jaune : $0.25 > CV > 0.50$ , Orange : $CV > 0.50$ .....	35

Tableau 11 : Caractérisation des groupes de parcelles obtenus par CAH à partir de 12 parcelles en distinguant les traitements T et PA (soit 24 individus) suivant 7 interventions culturales mises en place sur la campagne 2018. GITK : Groupe d'Itinéraire Technique, R : Rang, IR : Inter-Rang. Sur fond vert sont représentées les variables avec la plus grande contribution pour la structuration de l'ACP. Vert : $CV < 0.25$ , Jaune : $0.25 > CV > 0.50$ , Orange : $CV > 0.50$ .....	37
Tableau 12 : Cumuls de précipitations annuelles et sur la période de croissance de la vigne d'avril à septembre et références bordelaises des cumuls de précipitations entre 1981 et 2010 (issus de InfoClimat).....	39
Tableau 13 : Synthèse de l'ensemble des résultats sur l'effet de la mise en place des PA en réponse aux différentes sous questions abordées dans le mémoire.....	43
Tableau 14 : Fréquence des services et dyservices associés aux PA. La couleur des services et dyservices réfère à la fréquence d'apparition au sein des parcelles d'étude. Vert : fréquent (0.50 à 0.60), Bleu : peu fréquent (0.25 à 0.50), Violet : rare (0 à 0.25). S : Service, D : Dyservice, N : Neutre.....	45
Tableau 15 : Puissance a posteriori calculée pour chaque performance viticole sur les modèles linéaires sélectionnés utilisés au sein des GPC.....	48
Tableau 16 : Résultats de l'analyse a priori sur le rendement pour déterminer la puissance statistique qui en découle sur le poids de bois de taille, le poids pétiolaire et le poids des baies.....	49

## Sigles et acronymes

**CS** : Culture de Services

**CV** : Coefficient de Variation

**ETPP** : Evapotranspiration de Penmann

**EV** : Engrais Vert

**ITK** : Itinéraire Technique

**MO** : Matière Organique

**MS** : Matière Sèche

# Introduction

La France se place en deuxième producteur mondial de vin avec 755 000 hectares de vignes en production, soit 3.67 milliards de litres (Alim'Agri, 2018). Cette quantité s'accompagne aussi d'une volonté de qualité car 92% de la filière viticole française est produite sous label : 59% en AOP/AOC et 33% en IGP (INAO, 2018). Le vignoble bordelais se place au premier rang de la filière viticole française en terme de surface de production et de qualité des vins produits. En effet, il représente 15% du vignoble national avec 115 223 hectares en 2019 avec 65 AOC soit 26% des surfaces viticoles nationales sous AOC, ce qui en fait la première surface viticole française sous le signe de la qualité (Agreste, 2020).

La viticulture possède les indicateurs moyens de fréquence de traitement (IFT) parmi les plus élevés. Tous traitements confondus, l'IFT moyen français s'élève à 15.3 en 2016 (Agreste, 2019). L'IFT des fongicides est de 12.7 (Agreste, 2019) car la vigne est particulièrement sensible aux champignons tels que l'oïdium, le mildiou, le botrytis et le black-rot (Valdés-Gómez et al., 2011). L'IFT des herbicides est de 0.7, ils sont souvent responsables de la diminution de la qualité des eaux. Le plan Ecophyto II+ a pour objectif de réduire l'usage des produits phytopharmaceutiques de 50% d'ici 2025 et de stopper l'usage du glyphosate d'ici fin 2020 (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018). Trouver des alternatives à l'utilisation des produits phytosanitaires constitue donc un enjeu capital pour conserver les performances viticoles. Certaines alternatives peuvent répondre à cet enjeu, comme le travail mécanique du sol ou l'enherbement du vignoble (Gontier et al., 2013). Les sols des parcelles viticoles sont exposés à de nombreux risques et notamment au phénomène d'érosion, ainsi un travail mécanique du sol peut accroître ce processus (García-Ruiz, 2010; Le Bissonnais and Andrieux, 2007). L'enherbement des rangs et des inter-rangs, qu'il soit semé ou spontané, représente à la fois une alternative aux produits phytosanitaires et un levier pour une gestion durable des sols. En effet, l'enherbement peut apporter de nombreux services écosystémiques à la parcelle tant au niveau des propriétés physiques des sols : amélioration de la structure des sols (Blanco-Canqui et al., 2015; Guzmán et al., 2019; Polge de Combret - Champart et al., 2013) ou réduction du ruissellement (Celette et al., 2008) ; qu'au niveau des propriétés chimiques : augmentation du taux de matière organique (MO) (Fourie, 2012) ou restitution d'éléments minéraux (Hartwig and Ammon, 2002; Thomas and Archambeaud, 2016; Thorup-Kristensen et al., 2003). L'enherbement est tout de même à adapter au contexte pédoclimatique de la parcelle afin d'éviter la compétition hydrominérale avec la vigne (Celette et al., 2009, 2008; Garcia et al., 2018).

Le projet VERTIGO a pour but de promouvoir la mise en place de gestion durable du sol au sein du bassin bordelais. Il vise notamment à acquérir de nouvelles connaissances et à accompagner les agriculteurs dans leur gestion des enherbements. Ceci ayant pour but l'allongement des intervalles de temps des couverts et leur implantation sur de plus grandes surfaces. Ce mémoire de fin d'étude, réalisé dans le cadre du projet VERTIGO, a pour but d'évaluer l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles : le rendement, la vigueur de la vigne et le poids et la composition des baies.

La problématique de ce mémoire est : **Quels sont les effets des pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles de parcelles suivies sur plusieurs années dans des vignobles bordelais ?**

Ce mémoire présentera d'abord les connaissances sur les déterminants des performances viticoles en réponse à la mise en œuvre de pratiques de gestion durable du sol. Le contexte autour des objectifs et de la mise en œuvre du projet VERTIGO seront ensuite abordés. Puis, la démarche, les dispositifs expérimentaux ainsi que le traitement des données seront présentés. Les résultats obtenus seront ensuite présentés et analysés. Pour finir, les résultats et la méthode seront discutés pour finir sur la mise en perspective du projet.

# I. Contexte et état de l'art

## I.1. Performances viticoles et nutrition de la vigne

### I.1.1. Elaboration du rendement de la vigne et vigueur

La vigne est une espèce pérenne à développement indéterminé dont le rendement peut se décomposer comme suit (Figure 1).

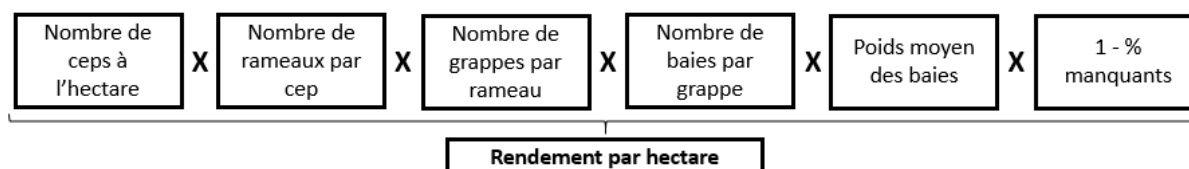


Figure 1 : Décomposition du produit du rendement annuel de la vigne – Adapté de Guilpart (2014).

**Le rendement de la vigne est élaboré sur 2 années consécutives** (Vasconcelos et al., 2009) : l'année de production N et l'année précédente (N-1) comme représenté en Figure 2. Le nombre de grappes, le nombre de baies par grappe et le poids moyen de baies explique à hauteur de 60% , 30% et 10% respectivement les variations de rendement de la vigne (Clingeffer, 2010). Le nombre de grappes et le nombre de baies sont en partie déterminés lors de l'induction florale et de la différenciation des inflorescences lors de l'année N-1 au voisinage de la floraison (Guilpart, 2014). Le nombre de grappes pour l'année N est fixé après l'induction florale de l'année N-1. Le nombre de baies dépend également du nombre de fleurs formées lors de la différenciation des inflorescences. Le nombre de baies est déterminé après la fertilisation des ovules et l'avortement des baies, le nombre de baies dépend du nombre de fleurs pollinisées en année N. Le nombre final de baies peut être réduit par rapport aux nombre de baies potentielles par phénomène de coulure. Le nombre de rameaux est déterminé par la taille effectuée en hiver N-1 et déterminera le nombre de grappes pour l'année de production (Guilpart, 2014).

**Au cours du cycle de la vigne, plusieurs facteurs (biotiques et abiotiques) peuvent diminuer son rendement potentiel maximum** (Figure 2). Les facteurs abiotiques qui influent le plus sur l'élaboration du rendement sont la température (Wilkie et al., 2008), la lumière (Sánchez and Dokoozlian, 2005), le stress hydrique ainsi que les carences en nutrition minérales comme pour l'azote. Ces facteurs abiotiques affectent le nombre de grappes, le nombre de baies et le poids moyen de baies en année N-1 et en année N (Vasconcelos et al., 2009). Les principaux facteurs biotiques influant sur l'élaboration du rendement sont principalement des champignons que sont l'oïdium, le mildiou, le botrytis et le black-rot (Valdés-Gómez et al., 2011), ils interviennent principalement au cours de l'année de production (Guilpart, 2014).

Les contraintes hydriques et azotées en année N-1 lors de l'induction florale influencent la fertilité des bourgeons, donc le nombre de grappes et de baies observées en année N. **Les stress hydrique et azoté peuvent réduire jusqu'à 70% le rendement de la vigne** observé en année N s'ils interviennent lors de l'induction florale en N-1 (Guilpart et al., 2014). L'année N-1 est donc déterminante pour l'élaboration du rendement. Néanmoins, une gestion adaptée du stress hydrique permet de limiter une croissance végétative trop importante (Pellegrino et al., 2005). Les variations de température en année N lors de la formation des fleurs peuvent réduire jusqu'à 30% le nombre de fleurs par inflorescence (Keller and Tarara, 2010). Les variations de température lors de la fertilisation des fleurs peuvent aussi réduire le nombre de baies (Vasconcelos et al., 2009).



Un déficit en nutrition minérale (azote, potassium et magnésium) lors de la fertilisation des fleurs peut également réduire le nombre de baies dû à une perturbation de la croissance du tube pollinique qui ne parvient pas à féconder l'ovule (Vasconcelos et al., 2009). Un suivi pluriannuel de la vigne est donc nécessaire afin de prendre en considération l'ensemble des facteurs limitant le rendement.

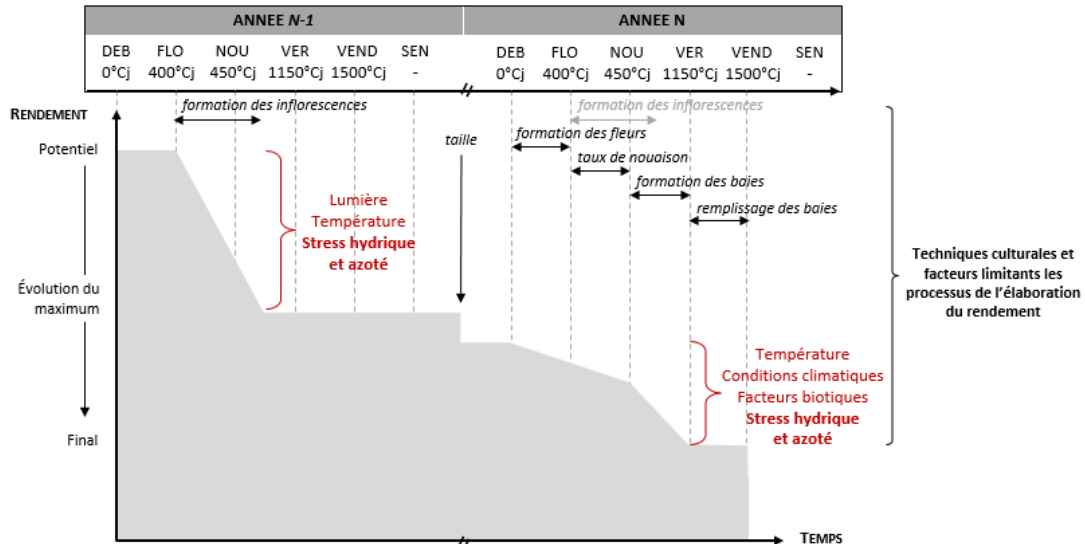


Figure 2 : Diminution du rendement potentiel maximum au cours du développement de la vigne – Adapté de Guilpart (2014).

### I.1.2. Caractéristiques et qualité des baies

**Les phases où le volume et la qualité des baies sont affectées sont situées après la floraison jusqu'à la récolte et correspondent aux périodes de formation et de maturation des baies** (Figure 2) (Vasconcelos et al., 2009). Le poids des baies est quasiment déterminé à la véraison de l'année N, et est principalement affecté par le stress hydrique entre la floraison et la véraison (Ojeda, Deloire, et Carbonneau 2001). La réduction de la taille des baies, provoquée par un stress hydrique entre floraison et véraison, induit une forte concentration en composés phénoliques (tanins, anthocyanes, flavonols) et en composés aromatiques (Ojeda et al. 2002).

**L'augmentation du volume des baies se décompose en deux phases** (Figure 3). La première phase rapide est due à une accumulation d'eau et de malate et se termine par un ralentissement de l'augmentation de volume. La seconde phase commence à la véraison, elle correspond à la maturation des baies où l'augmentation en volume est principalement due à l'accumulation d'eau, de sucres et de composés phénoliques et aromatiques. Lors de la maturation des baies, le sucre, les acides aminés, les composés phénoliques et le potassium augmentent tandis que les acides organiques (notamment maliques) diminuent (Mira de Orduña, 2010).

Un stress hydrique modéré (fraction d'eau transpirable du sol comprise entre 0.36 et 0.75) peut augmenter la qualité des baies avec des teneurs en phénols, en précurseurs aromatiques et en anthocyanes plus importantes (dos Santos et al., 2007; Pellegrino et al., 2006; Poni et al., 2007). **Le stress hydrique peut être utilisé comme un levier pour gérer la qualité des baies, s'il intervient en post-floraison, car il permet de diminuer le rendement de la vigne** (Pellegrino et al. 2006; Gaudin et al. 2014). Les plupart des composés des baies dépendent principalement du statut hydrique de la vigne plus que de son statut de nutrition azotée (Peyrot des Gachons et al., 2005). De plus, une vigueur trop importante entraîne un rendement important ce qui a pour conséquence de diminuer la qualité des baies (Delas, 2010).

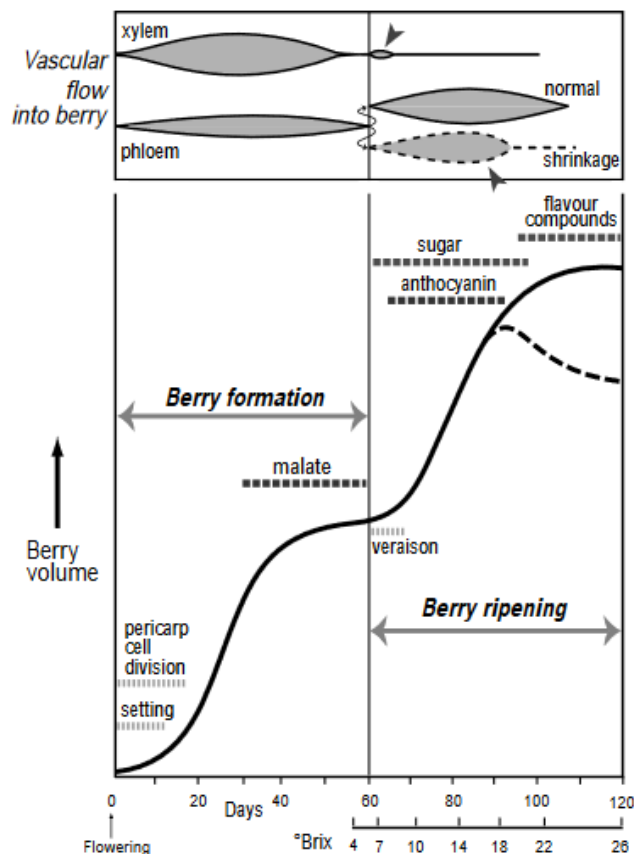


Figure 3 : Croissance des baies de la vigne – Issu de Coombe et McCarthy (2000).

**L'azote assimilable mesuré dans les baies est un bon indicateur et facile d'acquisition pour estimer la qualité de la nutrition azotée de la vigne** (Van Leeuwen et al., 2000). Une nutrition azotée en excès est préjudiciable pour la composition aromatique du vin des cépages destinés aux vins blancs, pour les cépages à vin rouge une faible alimentation azotée permet d'augmenter les composés phénoliques des baies (Van Leeuwen et al., 2000). Un stress hydrique ou azoté important limite les arômes potentiels des vins (Peyrot des Gachons et al., 2005).

### I.1.3. Niveaux de nutrition minérale et analyse pétiolaire

**Les analyses pétiolaires sont réalisées en routine par les viticulteurs afin de détecter d'éventuelles carences minérales de la vigne.** Elles permettent de quantifier aussi bien les éléments majeurs (azote, phosphore, potassium) et secondaires (calcium, magnésium) que les oligo-éléments. Les mesures sont réalisées sur les pétioles car ils sont plus riches en minéraux que le limbe et permettent donc de détecter rapidement les états de carence ou d'excès (Delas, 2010). Les seuils pour les éléments majeurs et secondaires pour des relevés au stade véraison sont repris dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Seuils bas et seuils hauts pour l'interprétation des analyses pétiolaires des éléments majeurs et secondaires au stade véraison sur des références bordelaises (Delas, 2010) et internationales (Benito et al., 2013; Dami, 2005; Dominguez et al., 2015). Ces seuils sont issus des moyennes des valeurs de seuils basses et hautes de différentes études, les valeurs sont reprises en Annexe 1.

Élément chimique	Norme bordelaise (mg/g)	Norme toutes références (mg/g)
Azote	4 à 6	5.4 à 8
Phosphore	1.2 à 1.8	1.36 à 2.14
Potassium	15 à 25	15.2 à 21.4
Magnésium	4 à 6	6.5 à 10.1
Calcium	20 à 40	20 à 30.4

## I.2. Gestion durable des sols viticoles

### I.2.1. Enjeux de la gestion durable des sols

**Une gestion du sol est dite durable si les services écosystémiques<sup>1</sup> qui sont rendus par le sol sont maintenus, voire renforcés, sans compromettre la biodiversité ou les fonctions qui sont à l'origine de ces services** (FAO, 2017). La gestion durable des sols a pour objectif de limiter l'érosion des sols et limiter la déstructuration du sol. Elle doit assurer une réserve de MO stable (voire croissante), la disponibilité des éléments minéraux nutritifs et assurer une faible déperdition de ces éléments. Elle doit aussi assurer une infiltration et un stockage de l'eau efficaces ainsi qu'une réduction de l'imperméabilisation des sols (notamment dû à une forte mécanisation).

### I.2.2. Problématique de gestion durable des sols viticoles bordelais

**Les parcelles viticoles sont exposées à de nombreux risques, c'est pourquoi la gestion durable des sols représente un enjeu important en viticulture** (Coll et al., 2011; Garcia et al., 2018). **Notamment, les pratiques utilisées dans les vignobles peuvent favoriser le phénomène d'érosion** : le désherbage chimique favorise le ruissellement même avec des précipitations peu intenses. En effet, ces sols ont tendance à être en permanence nus et compactés (par les passages d'engins) ce qui accroît le ruissellement. Un travail mécanique peut augmenter la porosité du sol, ce qui favorise l'infiltration de l'eau et ralentit le phénomène de ruissellement. Cependant, en fonction de la nature du sol, un travail intensif peut favoriser l'érosion des sols (Le Bissonnais and Andrieux, 2007). La mécanisation des cultures pérennes rend les parcelles viticoles plus **propices au phénomène de compaction**. Polge de Combret - Champart et al. (2013) ont décrit 69 profils culturaux (sur des vignobles de Côtes du Rhône, du Languedoc, de Bourgogne et du bordelais) et 75% étaient sujets à la compaction et leur qualités physiques (structure et porosité) étaient donc altérées. La compaction est en générale plus accentuée sur les inter-rangs que sur les rangs dû au trafic des engins agricoles et à la mécanisation (Veiga et al., 2017). Le travail mécanique en condition humide augmente la compaction des sols (Coulouma et al., 2006).

Les sols viticoles ont tendance à avoir un **faible niveau de MO** dû aux pratiques culturales de travail du sol utilisées (Coll et al., 2011). Le désherbage mécanique contribue à cette diminution de MO (Salomé et al., 2016). Ce problème est représentatif du bassin bordelais. L'utilisation d'herbicides sur les rangs et inter-rangs peut diminuer la restitution de MO des couverts implantés. Le travail du sol en vignoble est aussi souvent lié à **une perte d'azote dans le milieu entraînant pollution des eaux et diminution de la fertilité des sols** (García-Díaz et al., 2017). Le travail du sol et l'utilisation d'herbicides et de fongicides pour la lutte contre les adventices peut nuire aux populations microbiennes bénéfiques à la vigne (Vukicevich et al., 2016).

<sup>1</sup> Conditions et processus permettant aux écosystèmes naturels et aux espèces les composant de soutenir la vie humaine (Daily, 1997), pour les systèmes cultivés, ce soutien repose notamment sur l'approvisionnement en nourriture.

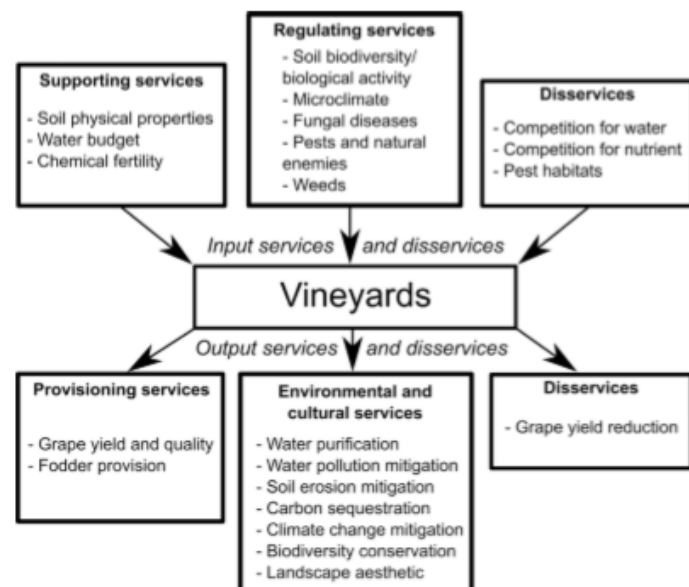
### I.2.3. Leviers pour la gestion durable des sols viticoles

Les principaux leviers de gestion durable des sols viticoles sont l'enherbement de la vigne, l'apport de MO et l'optimisation de l'utilisation des intrants (FAO, 2017). Une gestion durable des sols passe par des pratiques culturales limitant la minéralisation de la MO et la libération du carbone séquestré dans les sols, limitant ainsi la hausse de CO<sub>2</sub> atmosphérique (Dumanski, 2004). En effet, un travail intensif du sol va libérer le carbone séquestré dans le sol vers l'atmosphère. Afin de lutter contre la diminution de MO, l'apport d'amendement organique doit être envisagé. De plus, un taux de MO trop faible entraîne une détérioration de la qualité et de la structure des sols (Coll et al., 2011; FAO, 2017; Le Bissonnais and Andrieux, 2007). **L'enherbement des vignobles est cité comme une alternative prometteuse pour gérer les risques liés à la viticulture de manière durable** (FAO, 2017). Les couverts végétaux sont implantés pour répondre aux problématiques rencontrées dans les vignobles. De tels couverts seront dénommés « cultures de services » dans la suite du rapport en référence aux nombreux services qu'ils peuvent apporter.

### I.3. L'enherbement, levier pour la gestion durable des sols viticoles

Une **culture de service (CS)** est une culture qui n'est pas récoltée ou vendue mais qui est restituée au sol (Garcia et al., 2018). Les CS semées dans les vignobles, au travers des services rendus à la parcelle, permettent de répondre aux enjeux de gestion durable des sols à la fois en améliorant les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Les CS sont aussi en interaction avec la vigne et peuvent lui apporter des services et dyservices (Figure 4).

Figure 4 : Services et dyservices attendus des CS en vignoble – Issu de Garcia et al. (2018).



#### I.3.1. Services rendus aux sols viticoles

##### I.3.1.1. Amélioration des propriétés physiques du sol

La mise en place de CS en inter-rang permet de **limiter la compaction des sols** (Polge de Combret - Champart et al., 2013) et permet également d'augmenter la portance du sol pour le passage des engins (Ferrero et al., 2005). L'utilisation d'espèces à systèmes racinaires pivotant (comme les brassicacées) pourrait réduire le compactage en fracturant les horizons supérieurs, agissant alors comme un travail du sol (Blanco-Canqui et al., 2015). Les CS peuvent aussi **réduire l'érosion hydrique des sols en les couvrant** (Celette et al., 2008). D'une part, les CS protègent le sol du phénomène de « splashing » des gouttes de pluie (Thomas and Archambeaud, 2016). D'autre part, les CS réduisent le ruissellement et rendent les agrégats plus stables (Garcia et al., 2019; Goulet et al., 2004; Ruiz-Colmenero et al., 2013). **La stabilité des agrégats en présence d'une CS peut être jusqu'à 23% plus importante qu'en sol nu** (Guzmán et al., 2019). Cette stabilité des agrégats peut également être favorisée par la pratique de tonte des CS plutôt que par l'utilisation d'herbicides (Rosa et al., 2013).

**Les CS augmentent l'infiltration jusqu'à 45% par rapport à une pratique de labour** (Celette et al., 2008; Ruiz-Colmenero et al., 2013). Les CS peuvent aussi restaurer les propriétés physiques telle que la structure (Le Bissonais and Andrieux, 2007) ou encore réduire l'évaporation du sol ce qui réduit les pertes en eau (Bodner et al., 2007). La quantité de biomasse produite par les CS est corrélée positivement avec l'amélioration des propriétés physiques du sol, les espèces produisant beaucoup de biomasse (au-delà de 0.91T/ha/an) sont donc à privilégier (Guzmán et al., 2019). **La compétition pour les ressources hydriques et minérales est l'une des principales causes de refus de mise en place de CS** (Garcia et al., 2018).

#### I.3.1.2. Amélioration des propriétés chimiques et biologiques du sol

**L'implantation de CS permet d'augmenter la teneur en MO** dans les couches supérieures (entre 0 et 50 cm), avec un taux de MO jusqu'à 29% supérieur à un sol nu (Agnelli et al., 2014; Fourie, 2012; Guzmán et al., 2019). **Les CS augmentent également le taux d'azote du sol** dans le cas d'implantation de légumineuses fixatrices d'azote atmosphérique (Hartwig and Ammon, 2002; Thomas and Archambeaud, 2016). Une caractéristique récurrente des CS est la rétention des nitrates pour éviter la lixiviation (Thorup-Kristensen et al., 2003). Le C/N et la biomasse produite par les CS affectent la dynamique de restitution de l'azote (Finney et al., 2016; Vrignon-Brenas et al., 2016). Alternier entre CS de légumineuses et de non-légumineuses ou faire un mélange de ces espèces permet de combiner les propriétés des espèces (Couëdel et al., 2018). De même, faire un mélange spécifique permet de répondre au compromis de la rétention/restitution d'azote par complémentarité des fonctions végétales (White et al., 2017). En effet, les légumineuses ont une capacité de rétention moindre par rapport à celui des non-légumineuses (Tonitto et al., 2006). Les CS peuvent également rendre les autres éléments nutritifs plus disponibles à condition qu'ils soient déjà présents dans le sol. En effet, elles vont faciliter leur recyclage par la culture en production en évitant que ces éléments ne soient lessivés, insolubilisés ou immobilisés (Thomas and Archambeaud, 2016).

Les CS peuvent conserver la biodiversité des sols et les fonctions qui lui sont associées et améliorer les propriétés chimiques des sols (Garcia et al., 2018). Une augmentation de la diversité et de la richesse des espèces constituant les CS augmente la diversité et le nombre d'individus de populations microbiennes bénéfiques pour la vigne (Vukicevich et al., 2016).

### I.3.2. Interactions entre vigne et cultures de services

#### I.3.2.1. Interaction avec la ressource en eau

**Les CS prélèvent l'eau du sol dans des horizons également explorés par la vigne ce qui peut affecter l'état hydrique de la vigne et provoquer un stress.** Certaines CS transpirent plus que d'autres, comme la phacélie ou la vesce (Bodner et al., 2007), ce qui peut accentuer le stress hydrique de la vigne. Néanmoins, comme évoqué en I.1, ce stress hydrique peut diminuer le rendement et la vigueur de la vigne mais aussi améliorer la qualité des baies si le stress intervient à un moment précis (Gaudin et al., 2014; Guilpart et al., 2014; Pellegrino et al., 2006, 2005). De fait, la gestion des CS est directement liée au pilotage de la contrainte hydrique et est donc un facteur déterminant pour les performances viticoles. **La fraction d'eau transpirable du sol (FTSW)<sup>2</sup> est une variable représentant le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne.** La FTSW a donc un effet sur les processus physiologiques de la vigne et est un facteur influençant le rendement et la qualité des baies (Pellegrino et al. 2005). Pellegrino et al. (2006) ont caractérisé des classes optimales de FTSW au cours du temps et de la phénologie de la vigne. Il est possible de simuler le statut hydrique de la vigne, notamment la FTSW, par des approches de modélisation. Par exemple, **le modèle WaLIS permet de simuler le bilan hydrique de la vigne et de l'enherbement en vignobles enherbés et d'accéder à la fraction d'eau du sol accessible à la vigne** (Celette et al., 2010).

---

<sup>2</sup> FTSW = ASW/TTSW. FTSW : Fractionable Transpirable Soil Water, ASW : Available Soil Water, TTSW : Total Transpirable Soil Water

Néanmoins, la concurrence n'est pas recherchée au sein du bassin bordelais compte tenu de l'état de dégradation des sols (peu fertiles, tassés...) et du matériel végétal peu vigoureux (portes greffes) qui y est implanté (Lorelei Cazenave, communication personnelle). Le merlot, le cabernet sauvignon et le cabernet franc sont les principaux cépages rouges implantés dans le bordelais et le sémillon, le sauvignon blanc et la muscadelle sont les principaux cépages blancs (Agreste, 2020). Avant 1960, le matériel végétal implanté produisait de gros volumes avec une qualité assez faible, la mise en place de CS était donc nécessaire pour réduire la vigueur et accroître la qualité du vin produit. Depuis cette période, le matériel végétal a une forte valeur ajoutée en qualité et une faible vigueur conférée ainsi, la stratégie d'enherbement n'est plus la même. En effet, la qualité des baies risque de diminuer en cas de trop forte concurrence avec les CS. Giese et al. (2014) ont constaté une réduction des poids de bois de taille et du nombre de couches de feuilles de la canopée, respectivement de 28% et 25%, lorsque les CS étaient implantées sur les rangs et inter-rangs plutôt que sur les inter-rangs uniquement. Celette et al. (2008) ont démontré que la compétition pour l'eau était limitée grâce à la plasticité racinaire de la vigne. En effet, les CS et la vigne n'exploraient pas les mêmes compartiments (celui de la vigne est plus profond) et elles n'ont de plus pas les mêmes cycles de développement.

#### I.3.2.2. Interaction avec les ressources minérales du sol

**Les CS (autre que les légumineuses) peuvent diminuer l'azote disponible pour le développement de la vigne car elle consomment l'azote du sol pour leur propre développement** (Celette et al., 2009). De plus, les CS peuvent diminuer la minéralisation de la MO en asséchant plus rapidement le sol du fait de leur transpiration, et ainsi réduire l'azote minéral pouvant être assimilé par la vigne (Celette et al., 2009). Celette et Gary (2013) ont montré que l'azote est le facteur limitant de la croissance précoce de la vigne en préfloraison. En post-floraison, l'eau est le principal facteur limitant la croissance de la vigne et l'absorption d'azote. Néanmoins, il ne semble pas y avoir une corrélation entre les deux stress en milieu où l'eau est limitante (Celette and Gary, 2013). La présence de CS permet de favoriser les flux d'azote entre les différentes couches du sol grâce à la mobilisation de l'azote pour leur propre développement. En effet, les CS permettent de remonter l'azote des couches profondes vers les couches de surface ce qui le rend plus accessible pour la vigne (Agnelli et al., 2014). Le choix des espèces est également important à prendre en considération. En effet, une CS de légumineuses peut fournir à la vigne jusqu'à 25% d'azote en plus qu'un couvert de graminées (Sulas et al., 2017).

Pour la compétition pour le phosphore, le potassium et le magnésium, des études ne sont pas parvenues à montrer qu'il y ait d'influence des CS sur la concentration de ces éléments au sein de la vigne (Perez-Alvarez et al., 2015). Cheng et Baumgartner (2004) ont montré que des transferts de minéraux entre CS et vigne seraient possible par le biais de mycorhizes issues d'AMF (Arbuscular Mycorrhizal Fungi). Cela permettrait à la vigne d'absorber plus facilement les nutriments issus de la destruction des CS via le réseau mycorhizien établi qui augmente les zones explorées par le système racinaire.

#### I.3.2.3. Interaction avec les bio-agresseurs

La mise en place de CS peut limiter le développement de certains bio-agresseurs. En effet, les CS limitent la croissance végétative excessive de la vigne. Ceci peut mener à une végétation plus poreuse qui rend le microclimat dans la canopée plus sec, limitant ainsi le développement des champignons comme le mildiou. De fait, plus la vigne est vigoureuse plus elle est appétante, plus elle sera susceptible d'être infectée par des bio-agresseurs (Valdés-Gómez et al., 2011). Une compétition pour la ressource azotée entre la vigne et les CS permet de réduire la qualité des baies, les rendant moins appétantes pour les bio-agresseurs, réduisant leurs dégâts sur les baies (Daane et al., 2018). La présence de CS fournit une ressource alternative pour les bio-agresseurs et peut leur fournir un habitat autre que la canopée de la vigne (Daane et al., 2018). Le contrôle des adventices peut être assuré par l'implantation de CS, notamment de légumineuses fourragères, et l'efficacité du contrôle des CS peut être évaluée par leur biomasse aérienne (Vrignon-Brenas et al., 2016).

### I.3.3. Compromis entre services et dyservices des cultures de services

**La mise en œuvre de CS doit limiter la concurrence hydrominérale entre vigne et CS afin de ne pas pénaliser le rendement viticole, en qualité et en quantité.** Cela peut se faire par le choix d'espèces peu compétitives ainsi que par des stratégies de gestion des CS (comme la date de destruction) permettant de limiter la compétition (Garcia et al., 2018). C'est un compromis qui s'établit alors entre services attendus et objectifs fixés par le viticulteur. La gestion des CS doit donc être adaptée au contexte et aux objectifs de production du viticulteur. Ripoche et al. (2010) ont montré l'importance d'une gestion des CS adaptative pour faire face aux variations inter et intra annuelles de contrainte hydrique afin de maintenir les objectifs de performances viticoles attendus par les viticulteurs tout en limitant les effets de leurs pratiques sur l'environnement.

### I.4. Pratiques de gestion durable des sols dans le bordelais

En 2016, en Gironde, 83% de la surface de vignoble est enherbée sur l'inter-rang (81% en couvert permanent, 2% en temporaire). En effet, 42% du vignoble bordelais est en désherbage mixte (soit avec au moins une intervention mécanique et une intervention chimique), 35% en chimique uniquement, 21% en mécanique uniquement (Agreste, 2019). En 2016, 52% de la surface des inter-rangs de l'ensemble des bassins viticoles est enherbée (42% permanents, 10% temporaires). Le bordelais fait donc partie des bassins viticoles les plus enherbés de France. En 2016, 6% de la surface des rangs de l'ensemble des bassins viticoles est enherbée. Par rapport aux pratiques de désherbage, 49% du vignoble français est en désherbage mixte, 31% en chimique uniquement et 19% en chimique uniquement (Agreste, 2019). Le vignoble bordelais est donc représentatif des pratiques de désherbage à l'échelle nationale.

### I.5. Contexte du projet VERTIGO dans le bassin viticole bordelais

Le projet VERTIGO a pour but de comprendre les effets des CS sur le sol et la vigne et de comprendre comment les pratiques agricoles influencent le système vigne/CS. Sa finalité est de pouvoir proposer des pratiques de gestion plus durables des enherbements afin de les transmettre aux agriculteurs du bassin viticole. Il a commencé en 2014 et prendra fin en 2020. Ce projet est financé par le CIVB (Conseil Interprofessionnel du Vin de Bordeaux) et se penche sur la problématique de l'enherbement dans les vignobles bordelais. L'INRAE est partenaire de VERTIGO et intervient en support scientifique, le suivi technique est réalisé par la Chambre d'Agriculture de Gironde. Ce travail de mémoire intervient en fin de projet et permet d'analyser les impacts de pratiques de gestion durable sur les performances viticoles (rendement et vigueur de la vigne, et qualité des baies). Les données ont été acquises en parcelles commerciales afin d'évaluer les conséquences de pratiques de gestion durable des sols (les pratiques dites « Pratiques Alternatives » ou « PA ») par rapport aux pratiques que les viticulteurs mettent déjà en place pour gérer leurs inter-rangs (les pratiques dites « Témoins »). Les interventions culturales mises en place sur les PA sont :

- **Le semis de CS d'espèces annuelles** (choisies en fonction des problématiques identifiées sur la parcelle) semées avant ou après vendanges et détruite au début du printemps.
- **Une gestion dite extensive des couverts spontanés.** Cette gestion a pour but d'être moins fréquente (1 à 2 tonte par saison), plus tardive et moins rase. Il y a également un renouvellement entre les inter-rangs qui sont semés avec des engrais verts et travaillés avec ceux en couverts spontanés tous les 3 à 5 ans. Cette gestion ayant pour but de limiter la compaction des sols et de favoriser la biodiversité sur la parcelle.
- **Un apport de 20 à 30T/ha de compost végétal** qui permet d'augmenter le taux de MO sur les sols les plus dégradés.
- **L'utilisation d'alternatives aux herbicides sous les rangs** (travail du sol et tonte des enherbements naturels) afin de limiter les fuites de molécules polluantes dans les sols et les ressources hydriques.

## I.6. Problématique et démarche

La problématique de ce mémoire est la suivante : **Quels sont les effets de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles de parcelles suivies plusieurs années dans des vignobles bordelais ?**

Cette étude se base sur l'analyse de données issues de dispositifs expérimentaux sur 14 parcelles commerciales dans le bassin viticole du bordelais sur 5 années. Les étapes de la démarche sont illustrées par la Figure 5 et par les sous questions ci-dessous.

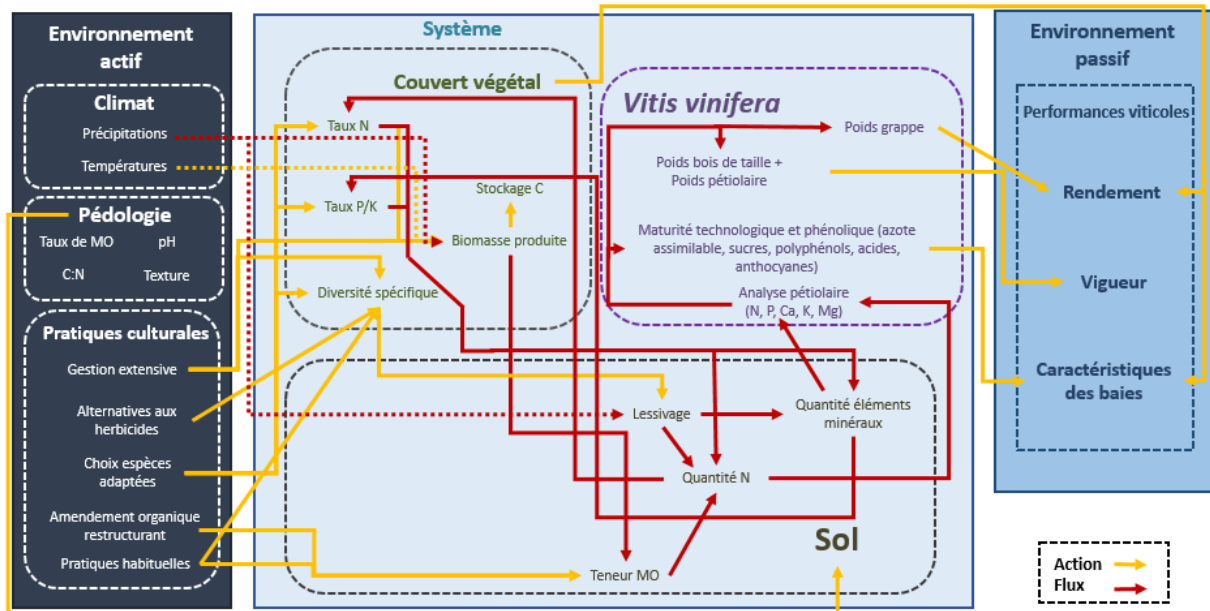


Figure 5 : Schéma conceptuel de la démarche d'analyse de données suivie au cours du mémoire. Ce schéma conceptuel a été produit sur la base de l'état de l'art et des variables mesurées lors de l'expérimentation. Il a été construit selon la démarche de modélisation conceptuelle formalisée par Lamanda et al. (2012).

- 1- **Effet de la mise en place des PA sur les variations des performances viticoles.** Analyser les variations des performances viticoles (Environnement passif, Figure 5) en relation avec les pratiques, les caractéristiques pédoclimatiques et les traitements PA et Témoin (Environnement actif, Figure 5).
- 2- **Effet de la mise en place des PA sur la stabilité des performances viticoles.** Analyser la variabilité des performances viticoles (Environnement passif, Figure 5) en relation avec les traitements PA et Témoin.
- 3- **Identification de groupes de parcelles homogènes où la mise en place des PA aurait un effet sur les performances viticoles.** Proposer des typologies de parcelles basées sur les caractéristiques pédoclimatiques et d'itinéraires techniques (Environnement actif, Figure 5) puis mener les analyses sur ces groupes afin de voir si la mise en place des PA a un effet sur les performances viticoles qui est fonction des groupes établis (Environnement passif, Figure 5).
- 4- **Identification des facteurs limitants pour les performances viticoles au sein des traitements.** Identifier les facteurs limitants pour les performances viticoles sur les traitements. Les facteurs explicatifs identifiés sont la biomasse produite par les couverts végétaux et les analyses pétiolaires réalisées sur la vigne (Système, Figure 5).
- 5- **Identification des services et dyservices potentiels apportés à la parcelle. Réalisation de la mise en place des PA sur un aspect socio-technique.** Identifier s'il y a compétition avec le couvert pour les ressources hydriques et minérales. Evaluer si les services visés par la mise en place des PA sont remplis (effet mulch, apport de MO et restitution de minéraux). Comparer les temps de travaux entre les traitements Témoins et PA.



## II. Matériels et méthodes

### II.1. Description du dispositif expérimental

#### II.1.1. Localisation des parcelles commerciales étudiées

Le réseau de 14 parcelles<sup>3</sup> est situé dans le bassin viticole de Gironde (Figure 6). Ces parcelles ont été sélectionnées car elles sont représentatives des principaux types sols et différents systèmes de production du vignoble bordelais et de ses multiples AOC. Leur nom utilisé pour la suite du mémoire sont présentés en Figure 6.

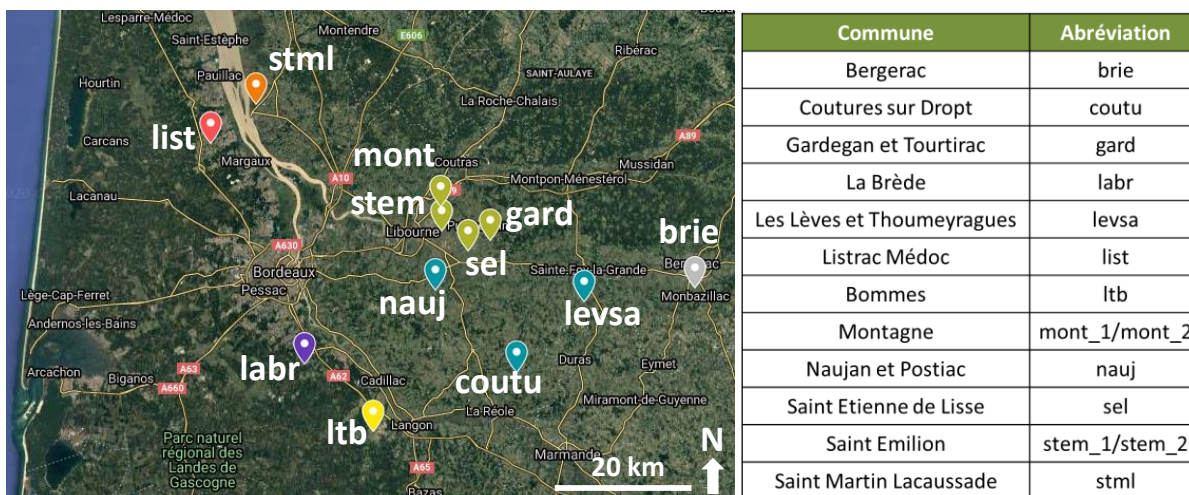


Figure 6 : Localisation et abrégations des 14 parcelles étudiées dans le réseau VERTIGO. Les parcelles sont localisées sur différents vignobles bordelais, en orange : Blayais, en rouge : Médoc, en vert : Libournais, en bleu : Entre-deux-Mers, en violet : Graves, en jaune : Sauternais et en gris : vignoble de Bergerac.

#### II.1.2. Caractéristiques spatiales du dispositif sur les parcelles

Chaque parcelle est divisée en 2 parties : d'un côté le traitement « Témoin » et de l'autre le traitement « Pratiques Alternatives » (PA) (Figure 7).

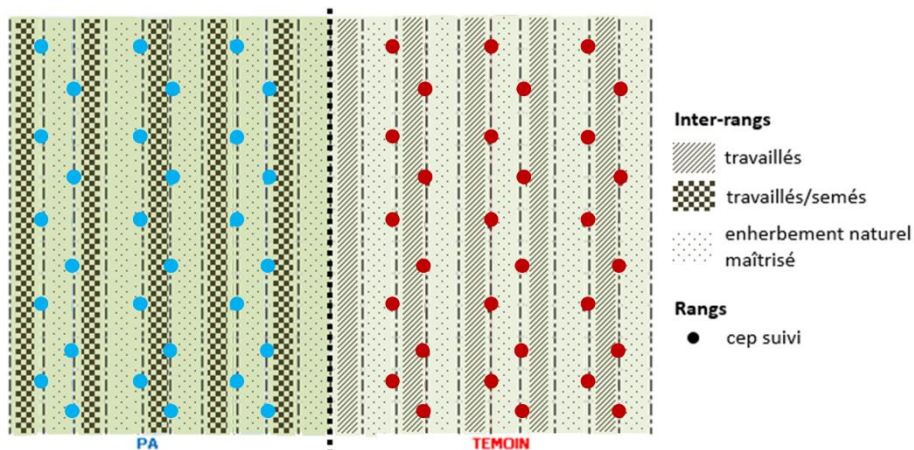


Figure 7 : Dispositif expérimental mis en place sur les parcelles.

Les PA ont été mises en place sur le côté des parcelles qui ont été identifiés comme moins performants. Les pratiques mises en place sur les PA sont décrites en I.5.

<sup>3</sup> On notera que 2017 marque la date de changement de parcelle pour mont et stem. Ainsi, nous avons respectivement mont\_1 et stem\_1 de 2014 à 2016 et mont\_2 et stem\_2 de 2017 à 2019. Les localisations entre les anciennes parcelles et les nouvelles étant très proches, elles sont localisées par le même point.

Sur chaque traitement, 1 inter-rang sur 2 est en enherbement naturel maîtrisé (ENM) qui permet de laisser se développer un couvert végétal spontané en le tondant pour qu'il ne soit trop concurrentiel pour la vigne. Sur les Témoins, l'autre inter-rang est travaillé, pour les PA, ces inter-rangs sont travaillés puis semés avec un mélange de CS choisi selon les problématiques de la parcelle (Figure 7). Pour chaque traitement, les variables sont mesurées sur 30 ceps répartis sur 6 rangs. Les données récoltées sont moyennées sur ces rangs, nous avons donc pour chaque année 3 répétitions de 10 ceps par traitement.

### II.1.3. Caractérisation des pratiques mises en place sur les dispositifs

#### II.1.3.1. Interventions culturales des traitements

La CA de Gironde a suivi les pratiques des viticulteurs en 2018. Nous posons l'hypothèse que ces pratiques réalisées en 2018 sont représentatives des pratiques réalisées sur l'ensemble des années d'étude (2014 à 2020) d'après l'expertise de la CA. Les interventions culturales issues de ce suivi sont reprises dans le Tableau 2. Les PA mises en place sur les parcelles comprennent un ensemble de pratiques variables selon les parcelles. De même, les Témoins étant les pratiques habituelles de viticulteurs, les Témoins comprennent donc aussi un ensemble de pratiques variables selon les parcelles.

Tableau 2 : Interventions culturales mises en place par parcelle sur les traitements Témoins et PA basées sur le suivi de 2018. Les fréquences indiquées sont des fréquences annuelles. La matière sèche des CS est issue de la moyenne des masses produites respectivement par parcelle entre 2015 et 2019. IR : Inter-Rang, R : Rang.

Interventions culturales		Densité plantation (pieds/ha)	Masse de MS produite par les CS semés (T/ha)	Fréquence désherbage mécanique R	Fréquence désherbage chimique R	Fréquence tonte sous R	Fréquence désherbage mécanique IR	Fréquence tonte IR
Parcelle	brie	T	4280	0	2	0	0	3
		PA		8,9	2	0	0	3
	coutu	T	3333	0	1	0	0	2
		PA		9,2	1	0	0	2
	gard	T	5000	0	1	3	0	2
		PA		10,1	1	3	0	3
	labr	T	6666	0	5	0	0	4
		PA		4,9	5	0	0	3
	levsa	T	3333	0	0	2	0	0
		PA		5,2	0	2	0	0
	list	T	6666	0	5	0	0	2
		PA		5,1	5	0	0	2
	ltb	T	6173	0	2	0	0	1
		PA		8,1	2	0	0	3
	mont	T	5000	0	0	1	0	1
		PA		4,6	0	1	0	2
	nauj	T	3636	0	1	0	0	1
		PA		7,1	0	0	3	1
	sel	T	6060	0	5	0	0	3
		PA		6,3	5	0	0	3
stem	T	6494	0	5	0	0	4	
	PA		9,3	7	0	0	4	
stml	T	4545	0	3	0	2	0	
	PA		7,4	3	0	0	0	

### II.1.3.2. Choix des espèces semées sur les PA en culture de service

Suite à des essais de la CA de Gironde et du complément au cahier technique *Choisir et réussir son couvert végétal pendant l'interculture en AB* (ITAB, 2012), les espèces ont été choisies pour répondre aux problématiques identifiées sur les parcelles (Tableau 3).

Tableau 3 : Espèces semées comme CS sur les traitements PA afin de répondre aux problèmes liés au sol identifiés sur les parcelles d'étude.

Problèmes identifié sur la parcelle	Parcelles concernées	Choix de l'espèce	Espèces semées
Vigueur moindre	gard, ltb, nauj, stem, stml, list, mont, brie, coutu, labr	Légumineuse	Féverole, Gesse, Lotier, Pois fourrager, Trèfle d'Alexandrie, Trèfle de perse, Trèfle incarnat, Vesce
Manque éléments nutritifs	gard, nauj, stml, levsa, list, mont, brie, coutu, labr		
Tassement important	gard, nauj, sel, levsa, list, mont, brie, coutu	Céréale	Avoine, Orge, Seigle, Seigle hybride
Très drainant	ltb, stem		
MO moindre	gard, nauj, stem, stml, levsa, list, mont, brie, coutu, labr		
Hydromorphie	sel, list		
Battance importante	coutu		
pH basique	gard, ltb, sel, stem, stml	Crucifère	Colza, Moutarde, Radis, Radis chinois, Radis fourrager

#### II.1.4. Caractérisation pédoclimatique des parcelles

Les variables pédologiques sont issues de relevés de sol effectués à différentes dates. La teneur en MO et le rapport C:N sont issus de données de 2017 à 2019, ces données ont été moyennées car une seule mesure est réalisée pour chaque année, ceci donne donc une meilleure estimation de la teneur en MO et du C:N. Le pH, la capacité de rétention et le niveau des minéraux sont issus d'analyses de sol réalisées en 2014. Les variables climatiques sont issues de relevés météorologiques quotidiens des stations les plus proches des parcelles entre 2014 et 2019 (Annexe 2). Les températures moyennes, maximales et minimales sous-abris ainsi que les précipitations quotidiennes ont été récupérées via le logiciel DEMETER.

## II.2. Evaluation des performances et mesure des variables suivies

### II.2.1. Mesure des variables des performances viticoles

L'ensemble des relevés de performances viticoles par parcelle et année<sup>4</sup> d'étude est repris en Tableau 4. Les rendements et les poids de bois de taille ont été ramenés en T/ha (les résultats fournis ont donc été multipliés par la densité de plantation de la parcelle correspondante) car les densités de plantation sur les parcelles d'étude peuvent varier du simple au double en fonction des parcelles (Tableau 2).

<sup>4</sup> On notera que les performances de la vigne pour l'année 2017 seront écartées de l'analyse de données car l'ensemble des ceps des parcelles ayant gelé, il n'y a donc pas eu de mesures de variables viticoles effectuées.

Tableau 4 : Récapitulatif des variables mesurées et calculées représentatives des performances viticoles pour mener l'ensemble des analyses menées dans le mémoire. Les années sont les années où les mesures des variables ont été effectuées sur les parcelles correspondantes.

Performance correspondante	Variables mesurées – Variables calculées	Parcelles														Nombre total de données
		brie	coutu	gard	labr	levsa	list	ltb	mont_1	mont_2	nauj	sel	stem_1	stem_2	stml	
Rendement $\Delta_{\text{rendement}}$	<b>Poids récolté (T/ha)</b> 3 répétitions par année, parcelle et traitement	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2015 2016 2018 2019	2015 2016 2018 2019	2014 2015 2018 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	162
Vigueur $\Delta_{\text{vigueur}}$	<b>Poids de bois de taille (T/ha)</b> 3 répétitions par année, parcelle et traitement	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2015 2016 2018 2019	2014 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	171
	<b>Poids pétiolaire (g)</b> 1 répétition par année, parcelle et traitement	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	52
Caractéristiques des baies $\Delta_{\text{baies}}$	<b>Poids des baies (g)</b> 1 répétition par année, parcelle et traitement	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2015 2016 2018 2019	2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	42
	<b>Azote assimilable (mg/g)</b> 1 répétition par année, parcelle et traitement	2014 2015 2016	2014 2015	2014 2015 2016	2014 2015 2016	2014 2015 2016	2014 2015 2016	2015 2016	2014 2015 2016	- -	2014 2015 2016	2014 2015	- -	- -	2014 2015 2016	25
	<b>Concentration en polyphénols</b> 1 répétition par année, parcelle et traitement	-	-	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	-	2014 2015 2016 2018	-	-	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	33
	<b>Concentration d'anthocyanes (mg/L)</b> 1 répétition par année, parcelle et traitement	-	-	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	-	2014 2015 2016 2018	-	-	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	33
	<b>Concentration en sucres (g/L)</b> 1 répétition par année, parcelle et traitement	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	- 2018 2019	2018 2019	2014 2015 2016 2018 2019	51

Il y a très peu de manquants sur les parcelles, on considérera donc qu'il n'y en a pas. Les rendements et les poids de bois de taille mesurés sur les rangs sont supposés représentatifs du traitement de la parcelle. Neuf variables représentatives des caractéristiques des baies ont été mesurées : le poids des baies, l'azote assimilable, le pH, l'acidité totale, le TAP et la concentration en acide malique, en sucres, en anthocyane et en polyphénols totaux. Les variables trop fortement corrélées entre elles ont été écartées. En effet, les conserver aurait affecté les résultats des analyses multivariées. Les corrélations deux à deux ont été calculées par corrélation de Pearson (Annexe 3), le seuil de |0.5| a été fixé comme seuil de forte corrélation (Cohen, 1988), ainsi lorsque des variables sont fortement corrélées seule l'une d'entre elle est conservée afin de mener les analyses dessus (celle qui possède le plus de mesures est conservée). **Cinq variables ont été retenues pour caractériser les baies** : le poids des baies, l'azote assimilable et la concentration en sucres, en anthocyane et en polyphénols totaux.

### II.2.2. Caractérisation des couverts et mesures réalisées

La biomasse fraîche des CS a été mesurée à destruction des couverts à l'aide de quadrats de 1m<sup>2</sup> à 3 endroits différents. Les estimations de restitutions minérales (teneurs en azote, phosphore et potassium) des CS ont été générées avec **l'outil MERCI V2.1** (Méthode d'Estimation des Restitutions par les Cultures Intermédiaires) (Archambeaud and Minette, 2010). En 2020, les mesures de biomasse fraîche des CS sur les PA ont été complétées par les mesures de biomasse fraîche sur les couverts spontanés des PA et des Témoins selon la même méthode que pour les CS. En 2020, le quadrat avait une surface de 1.5 m<sup>2</sup>. La production de matière sèche (MS) des espèces composant les couverts spontanés des deux traitements ont été estimées avec l'outil MERCI. Néanmoins, cet outil n'est référencé que pour les espèces fréquentes de cultures intermédiaires principalement de la famille des légumineuses, des graminées et des crucifères. Or les couverts spontanés comprennent d'autres espèces et d'autres familles. La MS des espèces non référencées a été calculée avec la moyenne des pourcentages de MS pour les espèces référencées dans MERCI.

L'estimation du taux de couverture des couverts sur les traitements PA et Témoins est repris de **l'outil d'aide à la décision BOCQS** (Boite à Outils pour la Caractérisation de la Qualité des Sols) (Kapfer, 2018) sur les mesures de 2018 et 2019 réalisées par la CA de Gironde. Les résultats issus de la mise en œuvre de la BOCQS sur les parcelles de l'étude seront mobilisés dans la partie discussion de ce mémoire.

### II.2.3. Estimation de l'état hydrique de la vigne

Afin d'estimer l'état hydrique de la vigne suite à la mise en place des PA, la **FTSW de la vigne a été modélisée en utilisant le modèle WaLIS (V3)** (Celette et al., 2010). Le but de cette modélisation est d'estimer le niveau de contrainte hydrique au sein des parcelles d'étude. Pour cela les parcelles list et labr ont été utilisées car les évapotranspirations de Penman (ETPP) étaient disponibles grâce à des stations météorologiques proches uniquement pour ces parcelles. Les données relatives aux parcelles et la paramétrisation de WaLIS sont présentés en Annexe 4.

## II.3. Stratégie d'analyses de données

L'ensemble des analyses de données et statistiques a été réalisé grâce au **logiciel RStudio** (version 3.5.3 (2019-03-11) - "Great Truth"). Le package 'tidyverse' a été utilisé pour la gestion des données (packages 'dplyr' et 'lubridate') et la réalisation des graphiques (package 'ggplot2'). L'analyse des données a été réalisée en deux temps : des analyses sans *a priori* sur l'ensemble des parcelles des performances viticoles puis des analyses avec *a priori* en se basant sur des typologies de parcelles (élaborées sur des caractéristiques pédoclimatiques et d'itinéraire techniques). Les analyses menées ont été réalisées en plan déséquilibré.

### II.3.1. Définitions des indicateurs calculés à partir de variables mesurées

#### II.3.1.1. Indicateurs pour les performances viticoles

Pour permettre la comparaison entre parcelle, nous avons défini des potentiels pour le rendement, le poids de bois de taille, le poids pétiolaire, le poids des baies et la concentration en anthocyane. Les potentiels sont définis par parcelle comme le maximum de la variable mesurée que la parcelle a atteint quelle que soit le traitement et l'année. Ce sont donc les écarts aux potentiels qui seront étudiés dans la suite du mémoire et seront notés  $\Delta_y$  :

$$\Delta_{y,i} = \text{potentiel}_i - \text{valeur}_{y,i}, \quad \text{avec } i : \text{ la parcelle et } y : \text{ la variable}$$

Pour la concentration en polyphénols totale, la concentration en sucre et l'azote assimilable définir un potentiel comme le maximum que la variable peut atteindre n'aurait pas de sens. En effet, pour ces 3 variables, ce ne sont pas le maximum que les viticulteurs recherchent mais une valeur intermédiaire (David Kapfer, communication personnelle) c'est pourquoi les analyses sur ces valeurs seront toujours menées sur les valeurs brutes.

Au cours des 5 années d'étude, des analyses pétiolaires ont été réalisées sur la vigne sur chacun des traitements des parcelles. Elles permettent de quantifier les éléments majeurs que sont l'azote, le phosphore, le potassium et certains éléments secondaires que sont le calcium et le magnésium.

#### II.3.1.2. Indicateurs pour l'évaluation des services fournis par les CS

Afin d'estimer le service engrais vert des CS, les restitutions minérales générées par MERCI seront utilisées pour estimer le niveau moyen de minéraux restitué à la parcelle. Afin d'estimer le service de restitution de MO des CS et des sarments de vigne le modèle de Hénin Dupuis (Hénin and Dupuis, 1945) a été utilisé pour estimer les variations de MO entre 2015 et 2020 sur le premier horizon. La formule suivante a été utilisée :

$$C(t) = \frac{\sum m \cdot k_1}{k_2} + (C(t_0) - \frac{\sum m \cdot k_1}{k_2}) e^{-k_2(t-t_0)}$$

$C(t)$  : quantité de carbone l'année t  
 $t$  : l'année t       $t_0$  : l'année d'origine  
 $m$  : quantité de C restituée (t de C/ha)  
 $k_1$  : coefficient isohumique  
 $k_2$  : coefficient de minéralisation annuel

Des analyses de sol des parcelles d'étude réalisées en 2014 ont permis de calculer le stock de MO à cette date par le produit de la masse de terre fine et le taux de MO, par parcelle. La quantité de carbone restituée par les CS a été estimée par le pourcentage de C contenu par la MS en fonction des différentes familles d'espèces : 45% pour les graminées et 44% pour les légumineuses et les crucifères (Boiffin et al., 1986). De même pour les sarments de vigne avec un pourcentage de C contenu par la MS de 63% (Nicolardot, 2016). Les  $k_1$  des parties aériennes des CS ont également été pris par famille d'espèces : 0.08 pour les graminées, 0.10 pour les légumineuses et 0.12 pour les crucifères (Boiffin et al., 1986). Le  $k_1$  des sarments de vigne est estimé à 0.3 (Germain and Duron, 2009). Les  $k_2$  ont été estimés selon la texture de la parcelle : 0.025 pour les sols sableux, 0.02 pour les sols sablo-argileux, 0.013 pour les sols argilo-limoneux et limono-argilo-sableux et 0.01 pour les sols argileux (Collaud, 2014).

### II.3.2. Caractérisation de la variation des performances viticoles et leurs déterminants

Une différence significative entre moyenne est posée pour un risque  $\alpha$  de 5%. Dans le cas de tests paramétriques, l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité des résidus ont été estimées par analyses graphiques, test de Shapiro-Wilk ou test de Levene (package 'car'). La sélection du meilleur modèle des variables à expliquer a été effectuée avec la fonction « drop1 ». Lorsque le facteur n'explique pas significativement la variation de la variable à expliquer, ce facteur est retiré du modèle et ainsi de suite jusqu'à obtenir le modèle le plus parcimonieux. Le récapitulatif des variables analysées et des méthodes d'analyses employées est repris en Tableau 5.

Tableau 5 : Récapitulatif des performances viticoles analysées et méthodes d'analyse employées.

Variable analysée	Analyse effectuée
<b>Rendement</b> <b>Poids de bois de taille</b> <b>Poids pétiole</b> <b>Poids des baies</b> <b>Azote assimilable</b> <b>Concentration en polyphénols</b> <b>Concentration d'anthocyanes</b> <b>Concentration en sucres</b>	Graphique – calcul du coefficient de variation (CV) Comparaison de variances – test de Fisher (variabilité) Modèle linéaire – ANOVA (variation) + test post-hoc de Tukey (package 'agricolae') si obtention de différences significatives
<b>Rendement</b> <b>Poids de bois de taille</b> <b>(données 2019 uniquement)</b>	Modèle linéaire – ANOVA (variation) + test post-hoc de Tukey (package 'agricolae') si obtention de différences significatives
$\Delta_{rendement}$ $\Delta_{poids.bois.taille}$ $\Delta_{poids.pétiole}$ $\Delta_{poids.baies}$ <b>Azote assimilable</b> <b>Concentration en polyphénols</b> $\Delta_{anthocyanes}$ <b>Concentration en sucres</b>	Modèle linéaire – ANOVA (variation) + test post-hoc de Tukey (package 'agricolae') si obtention de différences significatives Analyse de dominance – méthode de Budescu 1993 (package 'dominanceanalysis')

Les puissances statistiques *a priori* et *a posteriori* ont été calculées sur les modèles linéaires réalisés au sein des groupes pédoclimatiques avec les packages 'lsr' et 'pwr'.

### II.3.1. Réalisation des typologies de parcelles

L'ensemble des typologies de parcelles a été construit à partir des résultats des Analyses en Composantes Principales (ACP) ou des Analyses des Composantes Multiples (ACM) faites sur les variables permettant de caractériser les parcelles. Puis ces résultats d'ACP ou d'ACM ont été utilisés pour réaliser des typologies par des Classifications Ascendantes Hiérarchiques (CAH). Les packages 'FactoMineR' et 'factoextra' ont été utilisés respectivement pour réaliser les ACP, ACM et CAH et pour mettre en forme les résultats de ces analyses. La méthode de l'ACM a été choisie car nous avons des données quantitatives et qualitatives afin de caractériser nos parcelles. Les données quantitatives ont été transformées en données qualitatives en définissant des classes. Ces classes ont été réalisées en essayant au maximum d'avoir des classes d'effectifs proches. Dans un premier temps, afin de réaliser la typologie sur les caractéristiques pédoclimatiques, 2 ACM ont été réalisées afin de sélectionner les variables les plus structurantes des analyses. Les 2 ACM portaient toutes sur des groupes de variables caractérisant différentes propriétés des parcelles : les variables pédologiques (Tableau 6) et les variables climatiques (Tableau 7).

Tableau 6 : Variables caractérisant le contexte climatique des parcelles pour réaliser l'ACM sur les caractéristiques climatiques : le cumul des précipitations entre octobre et mars, le cumul des précipitations entre avril et septembre et l'indice héliothermique d'Huglin (IH). Des classes sont associées à ces variables pour réaliser l'analyse.

Cumul des précipitations d'octobre à mars (mm)	Cumul des précipitations d'avril à septembre (mm)	Indice héliothermique d'Huglin (IH) <sup>5</sup>
< 400	< 320	< 2100
de 400 à 600	de 320 à 370	> 2100
> 600	> 370	

<sup>5</sup> La valeur de 2100 a été prise comme seuils car elle définit le passage de la zone tempérée à la zone tempérée chaude (Carbonneau and Torregrosa, 2020).

L'indice héliothermique d'Huglin (IH) est utilisé pour caractériser les zones de productions viticoles et il est défini par (Tonietto and Carbonneau, 2004) comme :

$$IH = \frac{\sum_{01.04}^{30.09} (t_j - 10^\circ\text{C}) + (t_{xj} + 10^\circ\text{C})}{2} \times K,$$

$t_j$  : température moyenne du jour ( $^\circ\text{C}$ )  
 $t_{xj}$  : température maximale du jour ( $^\circ\text{C}$ )  
 $K$  : coefficient de longueur du jour indexé sur la latitude (pour le bordelais 1.02)

Tableau 7 : Variables caractérisant le contexte pédologique des parcelles utilisées pour réaliser l'ACM sur les caractéristiques pédologiques : le taux de MO, le pH, le rapport C:N, la capacité de rétention et le niveaux de minéraux du sol. Des classes sont associées à ces variables pour réaliser l'analyse.

Taux de MO (%)	pH	Rapport C:N	Capacité de rétention	Niveaux de minéraux
< 2.1 de 2.1 à 3 > 3	< 6 de 6 à 8 > 8	< 12.5 > 12.5	Filtrante : <i>sablo-argileux, sableux</i> Intermédiaire : <i>limono-argilo-sableux, limono-sableux</i> Forte : <i>argiles lourdes, argileux</i>	Faible Moyen

L'ACM sur les caractéristiques pédoclimatiques a été réalisée sur 5 variables actives : le cumul des précipitations entre avril et septembre, l'indice héliothermique d'Huglin, le taux de MO, le pH et la capacité de rétention. Les 14 parcelles ont été utilisées.

La méthode de l'ACP a été choisie lorsqu'il n'y avait que des variables quantitatives pour définir les groupes de parcelles. L'ACP a été réalisée sur les itinéraires techniques (ITK) mis en place avec 7 variables actives : la densité de plantation des ceps, la masse de MS produite par les CS (T/ha), la fréquence du désherbage mécanique sur le rang, la fréquence du désherbage chimique sur le rang, la fréquence de la tonte sous le rang, la fréquence du désherbage mécanique sur l'inter-rang et la fréquence de la tonte sur l'inter-rang. Seulement 12 parcelles ont été utilisées, car ce sont les données de 2018 qui ont servies pour faire la typologie et les parcelles mont\_1 et stem\_1 n'étaient plus suivies cette année.

Les analyses de l'effet du traitement sur les performances viticoles sont menées sur les valeurs brutes des performances viticoles au sein des groupes pédoclimatiques. En effet, nous avons fait des groupes pédoclimatiques homogènes qui nous permettent de faire des comparaisons entre parcelles de même groupe. Les analyses de l'effet du traitement sur les performances viticoles sont menées sur les  $\Delta_{performances}$  au sein des groupes d'ITK (sauf pour l'azote assimilable, la concentration en sucres et en polyphénols pour lesquelles les potentiels ne sont pas définis). En effet, la prépondérance des caractéristiques pédoclimatiques n'est pas prise en compte dans la typologie et pour pouvoir comparer les parcelles nous devons raisonner sur les  $\Delta_{performances}$ . La Figure 8 reprend les étapes de formation de typologie.

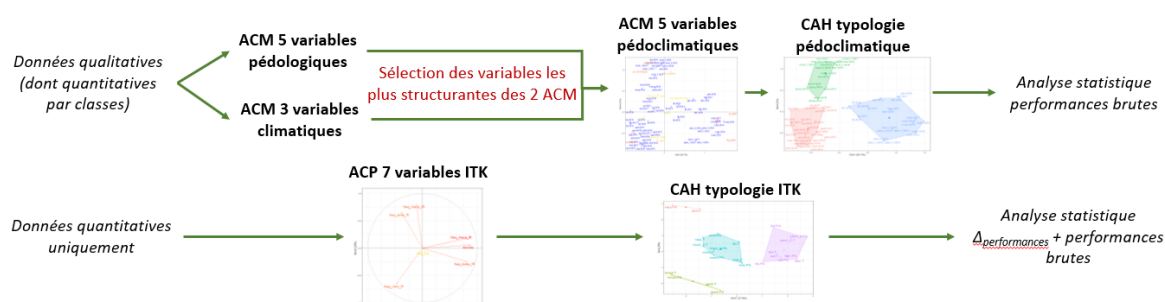


Figure 8 : Schéma récapitulatif des étapes de création des typologies pédoclimatiques et d'ITK.



### III. Résultats

#### III.1. Analyse des performances viticoles

##### III.1.1. Gammes de valeurs des performances viticoles

L'ensemble des performances sont très variables entre parcelles, au sein des parcelles pour une année donnée et sont aussi variables d'une année à l'autre (Tableau 8). Les plus grandes variations s'observent pour les rendements, les poids de bois de taille et l'azote assimilable avec respectivement des facteurs multiplicatifs de 35, 11 et 10 entre les valeurs minimales et maximales. Pour les autres variables de caractérisation des baies, les facteurs multiplicatifs sont moindres, ils sont compris entre 2 et 6. **Dans la suite de l'étude on cherche à identifier les causes de variation de ces performances en analysant les  $\Delta_{performances}$ .**

Tableau 8 : Gamme de variation des valeurs des performances viticoles<sup>6</sup>. CV : Coefficient de variation. CV est défini comme le rapport de l'écart-type et de la moyenne. Vert :  $CV < 0.25$ , Jaune :  $0.25 > CV > 0.50$ , Orange :  $CV > 0.50$ .

Variables	Indicateurs de gamme de variation des valeurs				
	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	CV
<b>Rendement (T/ha)</b>	0.62	21.71	8.12	4.51	0.56
<b>Poids de bois de taille (T/ha)</b>	0.71	7.89	2.67	1.27	0.48
<b>Poids pétiolaire (g)</b>	0.17	1.50	0.58	0.30	0.52
<b>Poids des baies (g)</b>	46	272	152	35.26	0.23
<b>Azote assimilable (mg/g)</b>	22	227	100.9	46.49	0.46
<b>Concentration en polyphénols</b>	11	29	20.29	3.43	0.17
<b>Concentration d'anthocyanes (mg/L)</b>	131	386	259.83	63.41	0.24
<b>Concentration en sucres (g/L)</b>	181	373	234	32.57	0.14

##### III.1.2. Rendement et poids de bois de taille au bout de 5 années d'expérimentation

Les rendements et les poids de bois de taille de 2019 après 5 années de mise en place des PA ne sont pas significativement différents entre traitement (Figure 9). On pouvait s'attendre à un temps de réponse de la vigne vis-à-vis du changement de pratiques, mais on ne le constate pas.

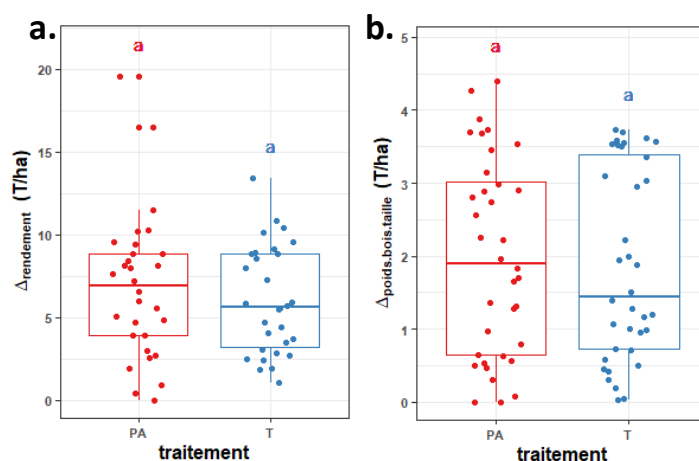


Figure 9 :  $\Delta_{rendement}$  (a) et  $\Delta_{poids.bois.taille}$  (b) de 2019 en fonction des traitements mis en place sur les parcelles. Les différences entre moyenne qui partagent une lettre ne sont pas significatives (test de Tukey).

<sup>6</sup> Les graphiques des performances viticoles par traitement, année et parcelle d'étude sont repris en Annexe 5.

### III.1.3. Variabilité des performances viticoles entre les traitements

Les variances des rendements entre les PA et les Témoins sont significativement différentes (Tableau 9). Pour les variables de vigueur de la vigne et de la qualité des baies, les variances ne sont pas différentes entre les PA et Témoins (Tableau 9). **La mise en place des PA augmente la stabilité des rendements au cours des années. Néanmoins, la mise en place des PA ne permet pas d'avoir d'autres performances viticoles plus stables au cours des années.**

*Tableau 9* : Résultats des tests de comparaison de variances de Fisher pour les performances viticoles brutes entre les PA et les Témoins. La p-value accompagnée d'étoile (\*) indique la significativité du résultat («\*» signifie p-value < 0.05). Les variances des performances entre les PA et les Témoins sont significativement différentes si p-value < 0.05.

Variables	CV PA	CV T	p-value
<b>Rendement (T/ha)</b>	0.52	0.58	0.040 *
<b>Poids de bois de taille (T/ha)</b>	0.45	0.50	0.110
<b>Poids pétiolaire (g)</b>	0.53	0.50	0.908
<b>Poids des baies (g)</b>	0.22	0.24	0.606
<b>Azote assimilable (mg/g)</b>	0.49	0.44	0.800
<b>Concentration en polyphénols</b>	0.16	0.17	0.559
<b>Concentration d'anthocyanes (mg/L)</b>	0.14	0.13	0.937
<b>Concentration en sucres (g/L)</b>	0.24	0.24	0.560

### III.1.4. Effet du traitement, de la parcelle et de l'année sur les variations de $\Delta_{performances}$ sur l'ensemble des années et contribution relative de chaque facteur

Les  $\Delta_{rendement}$  et  $\Delta_{vigueur}$ , sont expliqués par l'année, la parcelle et leur interaction mais les interactions de ces facteurs avec le facteur traitement permettent aussi d'expliquer ces variations (Figure 10). **La mise en place des PA a donc un effet sur le rendement et la vigueur de la vigne en fonction de la parcelle et de l'année où elles sont mises en place.** On notera que pour le rendement et le poids de bois de taille, l'interaction entre année et traitement n'est pas significative, ainsi quelle que soit l'année, la mise en œuvre du traitement ne modifiera pas différemment les  $\Delta_{rendement}$  et  $\Delta_{poids.bois.taille}$ . Les variations de  $\Delta_{baies}$  dépendent de l'année, de la parcelle et de leur interaction, le traitement n'influence pas ces variables (Figure 10). **La mise en place des PA n'a pas d'effet sur les caractéristiques des baies<sup>7</sup>.**

L'analyse de dominance a été réalisée sur les  $R^2$  totaux des modèles linéaires sélectionnés (Annexe 8). Le calcul de la contribution relative des **facteurs explicatifs des  $\Delta_{rendement}$  et  $\Delta_{vigueur}$  montre une forte contribution des interactions *annee:parcelle* et *traitement:parcelle*. Les  $\Delta_{rendement}$ ,  $\Delta_{poids.bois.taille}$  et  $\Delta_{poids.pétiolaire}$  sont respectivement expliqués à 84%, 79% et 62% avec ces 2 interactions (Figure 10). **Pour les  $\Delta_{baies}$ , cette analyse montre une forte contribution de l'interaction *annee:parcelle*.** En moyenne, les  $\Delta_{baies}$  sont expliquées à 75% par l'interaction *annee:parcelle*.**

La prépondérance de ces interactions peut traduire le fait que la mise en place des PA n'a pas une contribution élevée par rapport au contexte pédoclimatique des différentes parcelles qui lui est prépondérant. **On a donc une prépondérance des caractéristiques pédoclimatiques dans l'explication des  $\Delta_{performances}$ . C'est pourquoi nous étudions ensuite l'effet de la mise en place des PA au sein de groupes avec des milieux pédoclimatiques homogènes.**

<sup>7</sup> L'ensemble des p-values des modèles sélectionnés pour les performances viticoles sont présentées en Annexe 7.

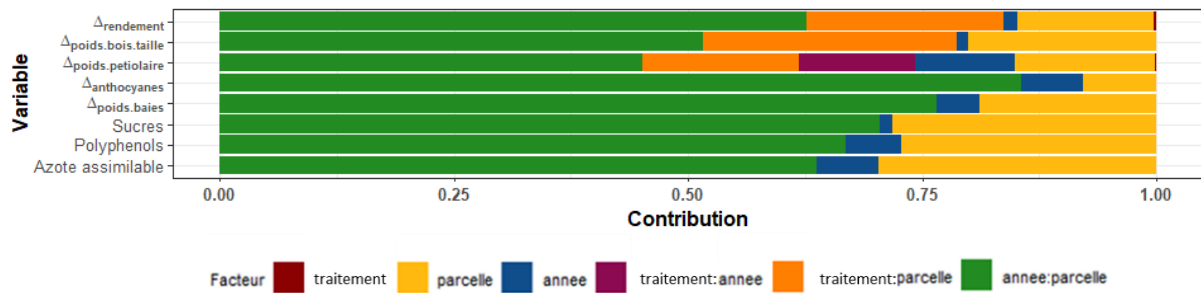


Figure 10 : Modèles linéaires sélectionnés<sup>8</sup> pour l'explication des variations des  $\Delta_{\text{performances}}$  et valeurs brutes des performances viticoles en fonction du traitement, de la parcelle, de l'année et de leurs interactions<sup>9</sup> et valeurs des contributions relatives issues de l'analyse de dominance pour chaque facteur des modèles linéaires sélectionnés. Les interactions entre variables sont symbolisées par « : ». La contribution représente le pourcentage d'explication du facteur par rapport au  $R^2$  global du modèle linéaire sélectionné.  $R^2$  correspond au pourcentage d'explication des facteurs du modèle sélectionné pour le  $\Delta_{\text{performance}}$  correspondant.

### III.1.5. L'effet du traitement sur les performances viticoles en milieu pédoclimatiques homogènes

#### III.1.5.1. Construction des groupes pédoclimatiques homogènes

Les 2 premiers axes de l'ACM expliquent 46.7% de la variabilité observée (Figure 11a.). L'axe 1 explique 25.7% et est défini par la capacité de rétention et le taux de MO du sol. L'axe 2 explique 21% et est défini par le pH du sol et le cumul de pluie d'avril à septembre. Les 3 groupes pédoclimatiques (GPC) obtenus par CAH (Figure 11b.,Annexe 9) sont décrit par leurs caractéristiques pédoclimatiques dans le Tableau 10. Le GPC\_1 correspond aux parcelles avec un pH basique, un niveau de MO élevé et une texture plutôt argileuse. A l'opposé, le GPC\_3 est caractérisé par des sols à tendance sableuse plutôt filtrant couplé avec un faible taux de MO et un pH acide. Le GPC\_2 a des caractéristiques pédologiques intermédiaires entre celles des GPC\_1 et GPC\_2.

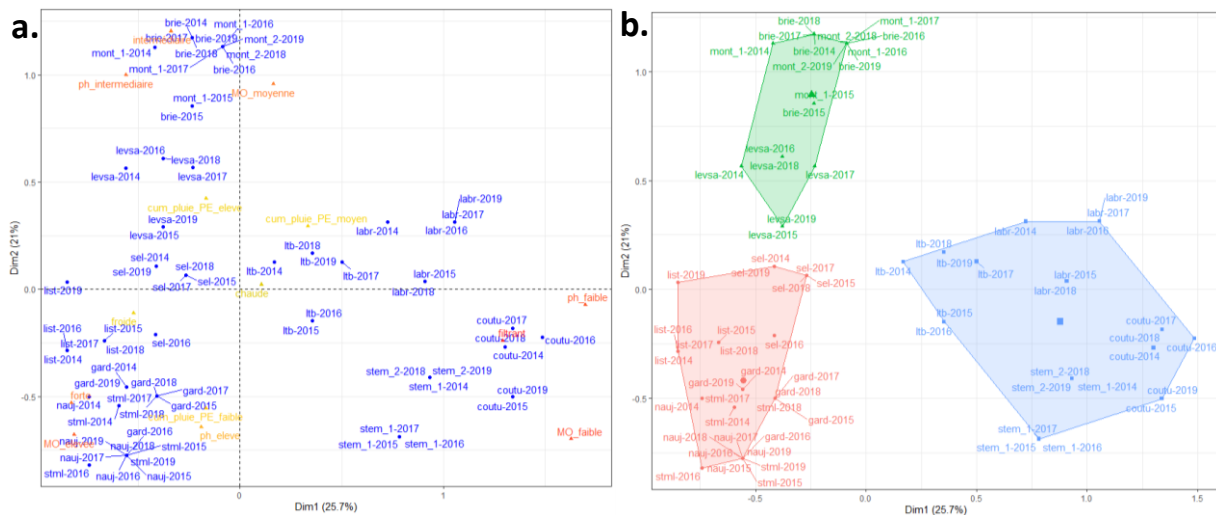


Figure 11 : a. Biplot des individus et des modalités des variables de l'ACM réalisée sur 14 parcelles de 2014 à 2019 (72 individus) et 5 variables caractérisant le contexte pédoclimatique des parcelles. Les individus sont représentés en bleu. Les variables sont représentées selon leur contribution à la construction des axes, des rouges les plus contributrices au jaunes les moins contributrices. b. GPC obtenus suite à la CAH. Rouge : GPC\_1, Vert : GPC\_2 et Bleu : GPC\_3.

<sup>8</sup> Les modèles linéaires sélectionnés sont présentés en Annexe 7.

<sup>9</sup> Les graphiques des  $\Delta_{\text{performances}}$  par traitement, année et parcelle d'étude sont présentés en Annexe 6.

Tableau 10 : Caractérisation des groupes de parcelles obtenus par CAH à partir de 14 parcelles sur 2 ou 5 années (soit 58 individus) suivant 5 caractéristiques pédoclimatiques. Les moyennes et coefficients de variation des performances viticoles au sein des GPC sont présentées. GPC : Groupe PédoClimatique. Sur fond vert sont représentées les variables avec la plus grande contribution pour la structuration de l'ACM. Vert : CV < 0.25, Jaune : 0.25 > CV > 0.50, Orange : CV > 0.50.

Caractéristiques	GPC_1 19 individus		GPC_2 25 individus		GPC_3 14 individus	
<b>Capacité de rétention</b>	Élevée <i>argiles lourdes, argileux</i>		Intermédiaire <i>limono-argilo-sableux, limono-sableux</i>		Filtrant <i>sablo-argileux, sableux</i>	
<b>Taux de MO</b>	Élevé 3 à 3.9%		Intermédiaire 2.1 à 3%		Faible 1.5 à 2.1%	
<b>pH</b>	Élevé 8 à 9		Intermédiaire 6 à 8		Faible 5 à 6	
<b>Cumul des précipitations (d'avril à septembre)</b>	Faible 210 à 320 mm		Élevé 370 à 500 mm		Moyen 320 à 370 mm	
<b>Indice héliothermique de Huglin (IH)</b>	Zone tempérée 2000 à 2200		Zone tempérée chaude 2200 à 2510		Zone tempérée 2000 à 2200	
Performances	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Rendement (T/ha)	6.9	0.63	7.4	0.43	9.7	0.49
Poids de bois de taille (T/ha)	2.2	0.46	2.5	0.43	3.3	0.42
Poids pétiolaire (g)	0.52	0.52	0.72	0.48	0.55	0.49
Poids des baies (g)	148	0.17	173	0.27	148	0.27
Azote assimilable (mg/g)	95.8	0.28	51.1	0.21	134.1	0.43
Concentration en polyphénols	19.8	0.15	19.5	0.30	22.4	0.20
Concentration d'anthocyanes (mg/L)	257	0.27	305	0.13	256	0.17
Concentration en sucres (g/L)	231	0.05	238	0.12	235	0.22

#### III.1.5.2. Effet des traitements au sein des GPC

L'ensemble des performances viticoles ne sont pas significativement différentes entre traitement au sein des GPC ni significativement différents entre GPC<sup>10</sup>. En moyenne, le GPC\_1 possède un niveau de rendement et de vigueur inférieur aux autres GPC, le GPC\_3 ayant les rendements et les poids de bois de taille les plus élevés. Ceci semble contre intuitif puisque les parcelles du GPC\_1 semblent avoir les caractéristiques pédoclimatiques les plus propices à des rendements et des poids de bois de taille plus élevés (taux de MO important, texture argileuse et IH de zone tempérée). Les caractéristiques des baies, elles sont plus stables sur les parcelles du GPC\_1 (notamment azote assimilable et la concentration en sucres). L'azote assimilable est très variable entre les GPC, elle double presque entre le GPC\_2 et le GPC\_3, néanmoins, les valeurs hautes d'azote assimilable sont couplées avec des CV plus hauts. Il y a donc une plus grande variabilité sur les parcelles avec de hautes valeurs d'azote assimilable.

<sup>10</sup> L'ensemble des graphiques des performances viticoles par GPC est présenté en Annexe 10.

### III.1.6. L'effet du traitement sur les $\Delta_{performances}$ pour des pratiques culturales homogènes

#### III.1.6.1. Construction des groupes de pratiques culturales homogènes

Les traitements Témoins et PA sont hétérogènes d'une parcelle à l'autre et les 2 traitements peuvent comprendre des interventions culturales communes (Tableau 2). Nous avons donc mené une analyse plus fine des différentes pratiques mises en place sur les parcelles d'étude sans tenir compte de la dénomination « PA » et « Témoins ». Cette typologie est basée sur le regroupement de parcelles ayant des interventions culturales proches ou communes, ceci pouvant mener à un autre regroupement que les traitements Témoins et PA. **Nous allons donc mener l'analyse au sein de groupes aux pratiques culturales homogènes.** L'analyse se base sur les  $\Delta_{performances}$  afin de limiter l'effet des caractéristiques pédoclimatiques sur les performances viticoles. Les 2 premiers axes de l'ACP expliquent 60.8% de la variabilité observée (Figure 12a. et b.). L'axe 1 explique 37.8% et est défini par la densité de plantation des ceps, la fréquence de désherbage mécanique du rang et la fréquence de tonte de l'inter-rang. L'axe 2 explique 23% et est défini par la fréquence du désherbage mécanique de l'inter-rang, la fréquence de tonte du rang et la fréquence de désherbage chimique du rang. Les 4 groupes d'itinéraires techniques (GITK) obtenus par CAH (Figure 12c., Annexe 11) sont décrits dans le Tableau 11. Le GITK\_4 correspond au groupe avec une fréquence de travail élevée de désherbage mécanique sur le rang et de désherbage mécanique et/ou tonte sur l'inter-rang couplée à une forte densité de plantation. Sur le GITK\_3, les mêmes ITK sont appliqués que sur le GITK\_4 mais avec une fréquence de travail plus faible. Le GITK\_2 est caractérisé par la mise en place de désherbage chimique sur le rang et de tonte sur l'inter-rang. Le GITK\_1 est caractérisé par la mise en place de tonte sur le rang et de désherbage mécanique sur l'inter-rang avec une faible densité de plantation.

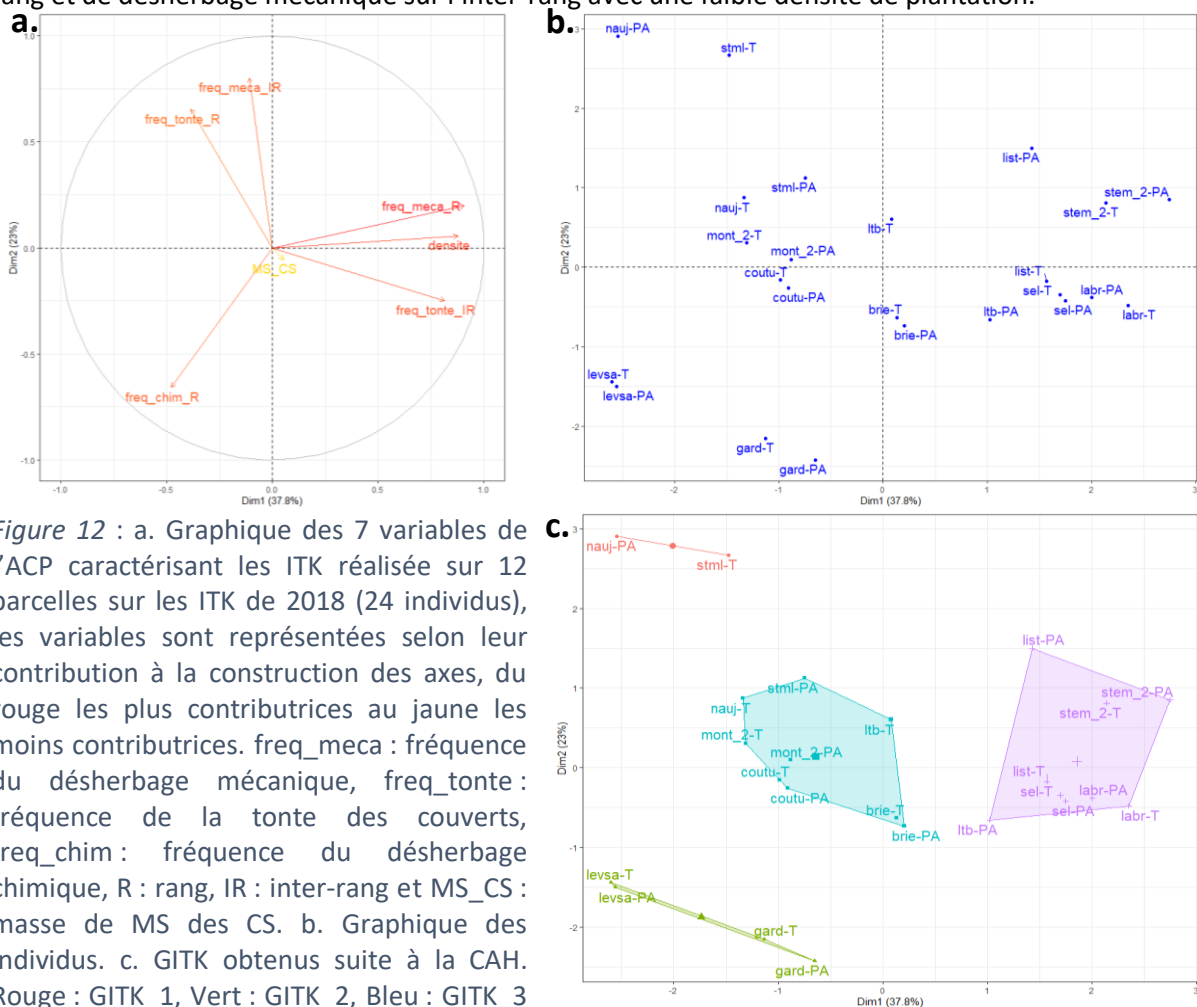


Figure 12 : a. Graphique des 7 variables de l'ACP caractérisant les ITK réalisée sur 12 parcelles sur les ITK de 2018 (24 individus), les variables sont représentées selon leur contribution à la construction des axes, du rouge les plus contributrices au jaune les moins contributrices. *freq\_meca* : fréquence du désherbage mécanique, *freq\_tonte* : fréquence de la tonte des couverts, *freq\_chim* : fréquence du désherbage chimique, R : rang, IR : inter-rang et MS\_CS : masse de MS des CS. b. Graphique des individus. c. GITK obtenus suite à la CAH. Rouge : GITK\_1, Vert : GITK\_2, Bleu : GITK\_3 et Violet : GITK\_4.

Tableau 11 : Caractérisation des groupes de parcelles obtenus par CAH à partir de 12 parcelles en distinguant les traitements Témoins et PA (soit 24 individus) suivant 7 interventions culturales mises en place sur la campagne 2018. GITK : Groupe d'itinéraire Technique, R : Rang, IR : Inter-Rang. Sur fond vert sont représentées les variables avec la plus grande contribution pour la structuration de l'ACP. Vert : CV < 0.25, Jaune : 0.25 > CV > 0.50, Orange : CV > 0.50.

Caractéristiques	GITK_1 2 individus 1 PA/1 Témoin		GITK_2 4 individus 2 PA/2 Témoins		GITK_3 10 individus 5 PA/5 Témoins		GITK_4 8 individus 4 PA/4 Témoins	
	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
<b>Densité de plantation</b>	Faible 3636 à 4545		Faible à moyenne 3333 à 5000		Moyenne à forte 3333 à 6173		Forte 6173 à 6666	
<b>Fréquence désherbage mécanique R</b>	Faible 0 à 3		Nulle à faible 0 à 1		Moyenne 1 à 3		Forte 2 à 7	
<b>Fréquence désherbage chimique R</b>	Nulle		de 2 à 3		Nulle		Nulle	
<b>Fréquence tonte R</b>	de 2 à 3		Nulle		Nulle		Nulle	
<b>Fréquence désherbage mécanique IR</b>	Moyenne 3		Nulle		Faible à moyenne 1 à 3		Forte 3 à 4	
<b>Fréquence tonte IR</b>	Nulle		Nulle à faible 0 à 2		Moyenne 2 à 3		Forte 3 à 4	
<b>MS produite par les CS</b>	7 T/ha		7.7 T/ha		7.5 T/ha		6.5 T/ha	
<b>Performances</b>	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV	Moyenne	CV
Rendement (T/ha)	4.4	0.50	8.1	0.33	7.8	0.56	8.8	0.60
Poids de bois de taille (T/ha)	1.8	0.42	2.3	0.39	2.8	0.52	2.7	0.46
Poids pétiolaire (g)	0.49	0.53	0.74	0.48	0.60	0.48	0.49	0.50
Poids des baies (g)	138	0.23	163	0.12	166	0.26	138	0.21
Azote assimilable (mg/g)	89.8	0.16	70.5	0.24	101	0.60	101.7	0.41
Concentration en polyphénols	20.1	0.17	19.3	0.24	19.3	0.60	20.8	0.41
Concentration d'anthocyanes (mg/L)	259	0.25	324	0.13	262	0.23	234	0.26
Concentration en sucres (g/L)	230	0.06	223	0.10	243	0.17	234	0.16

### III.1.6.1. Effet des traitements au sein des GITK

**Seuls les  $\Delta_{\text{rendement}}$  et  $\Delta_{\text{poids.bois.taille}}$  sont significativement différents entre les GITK (Annexe 12).** Pour le GITK 4 avec un désherbage mécanique avec une fréquence importante, les  $\Delta_{\text{rendement}}$  et  $\Delta_{\text{poids.bois.taille}}$  sont plus importants, on atteint moins souvent le potentiel des parcelles avec les pratiques mises en place sur ces parcelles. Les  $\Delta_{\text{rendement}}$  et  $\Delta_{\text{poids.bois.taille}}$  sont les mêmes sur les GITK 1, 2 et 3 que le rang soit désherbé chimiquement ou mécaniquement ou soit enherbé et que l'inter-rang soit tondu ou désherbé mécaniquement. **La mise en place de désherbage mécanique à forte fréquence (3 à 4 fois par an) sur le rang et l'inter-rang avec une forte densité de plantation, caractéristique du GITK 4, peut augmenter le risque de perdre du rendement et de la vigueur de la vigne.**

Les poids de bois de taille, le poids des baies et les concentrations en polyphénols, en anthocyanes et en sucres varient peu en fonction des pratiques mises en place. Pour le rendement, le GITK\_1 a pratiquement moitié moins de rendement que les autres GITK, l'enherbement maintenu sur le rang pourrait avoir un effet sur le niveau de rendement de la vigne. Pour l'azote assimilable, il est en moyenne 20% moins élevé dans les GITK\_1 et GITK\_2 par rapport aux GITK\_3 et GITK\_4. Les pratiques de désherbage mécanique et de maintien de l'enherbement sur l'inter-rang avec un entretien par tonte permettrait d'avoir un niveau d'azote assimilable plus important.

## III.2. Analyse des facteurs pouvant être limitants pour les performances viticoles entre les PA et les Témoins

### III.2.1. Comparaison de la nutrition minérale entre les traitements PA et Témoins

Pour comprendre les performances viticoles sur les PA et les Témoins, la nutrition minérale est comparée entre les traitements afin de voir si les PA ont un effet sur la nutrition de la vigne. Les résultats des analyses pétiolaires pour N, P, K, Ca et Mg sont présentés en Figure 13 en distinguant les PA et les Témoins.

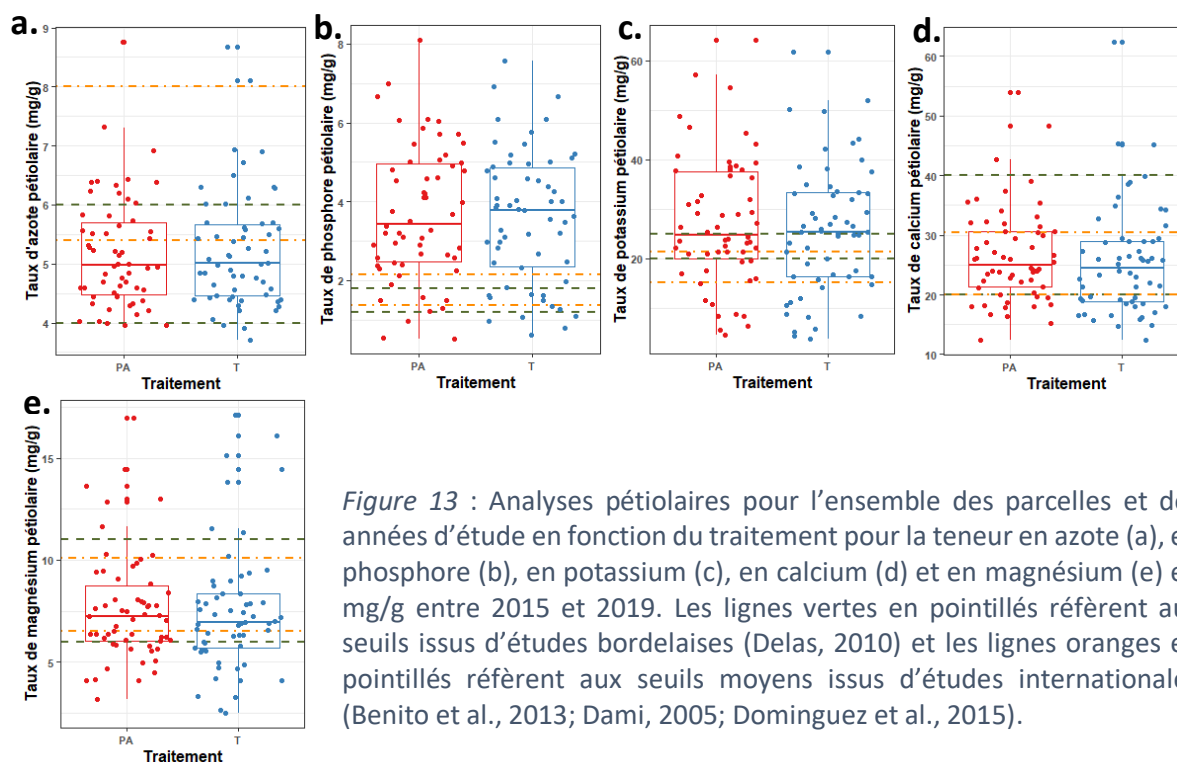


Figure 13 : Analyses pétiolaires pour l'ensemble des parcelles et des années d'étude en fonction du traitement pour la teneur en azote (a), en phosphore (b), en potassium (c), en calcium (d) et en magnésium (e) en mg/g entre 2015 et 2019. Les lignes vertes en pointillés réfèrent aux seuils issus d'études bordelaises (Delas, 2010) et les lignes oranges en pointillés réfèrent aux seuils moyens issus d'études internationales (Benito et al., 2013; Dami, 2005; Dominguez et al., 2015).

Le niveau des teneurs minérales pétiolaires mesurées est principalement situé dans les normes ou largement au-dessus (cas du phosphore). On ne constate pas de différence pour les nutriments minéraux entre les PA et les Témoins. **Les CS semées dans les traitements PA n'engendrent pas de compétition supplémentaire avec la vigne pour les ressources minérales.**

### III.2.2. Caractérisation du niveau de contrainte hydrique du bassin et des traitements

Les caractéristiques mensuelles de températures et de cumul de précipitations de 2014 à 2019 pour chaque parcelle sont présentées en Annexe 13. On constate que 2015 et 2017 ont été un peu moins pluvieuses que la moyenne (Tableau 12). Les cumuls annuels sont assez proches de la référence bordelaise. Pour les cumuls sur la période de croissance de la vigne, l'ensemble des années d'étude est situé sous la référence bordelaise (Tableau 12). Par rapport à la référence bordelaise, les pluies sont majoritairement concentrées sur la période de repos végétatif de la vigne, en moyenne, 59% du cumul des précipitations annuelles est compris sur la période de repos végétatif de la vigne.

Tableau 12 : Cumuls de précipitations annuelles et sur la période de croissance de la vigne d'avril à septembre et références bordelaises des cumuls de précipitations entre 1981 et 2010 (issus de InfoClimat).

Cumul des précipitations	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Référence bordelaise
Annuelles (mm)	922	584	874	745	918	1009	850
Période de croissance de la vigne d'avril à septembre (mm)	371	282	326	347	367	374	414

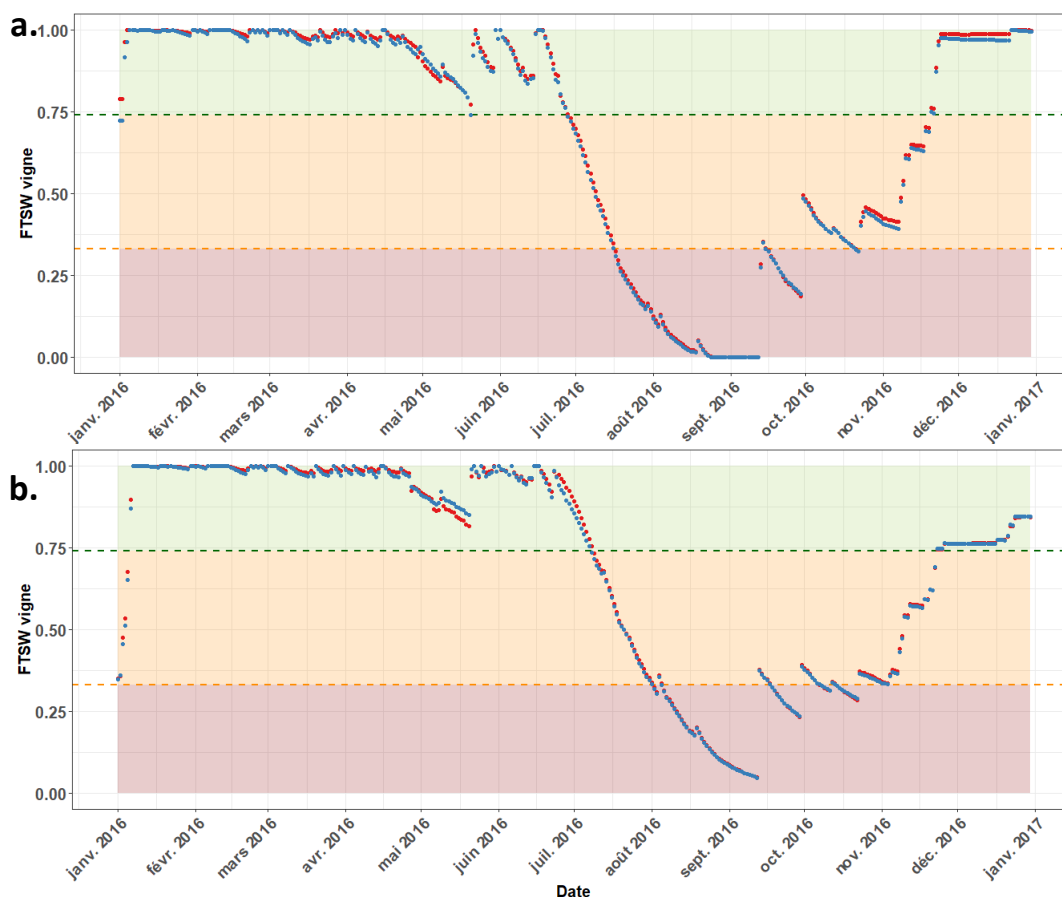


Figure 14 : FTSW modélisée avec WaLIS sur la parcelle Itb (a) et la parcelle labr (b) en 2016 pour les traitements PA (courbe rouge) et Témoin (courbe bleue). Les seuils correspondent aux seuils de stress hydrique issus de Pellegrino et al. (2006), en vert : situation de satisfaction des besoins hydriques de la vigne, en orange : situation de stress modéré pour la vigne, en rouge : situation de stress intense pour la vigne.



Afin de déterminer si la mise en place des PA, via le semis de CS particulièrement, engendre une contrainte hydrique supérieure à celle du Témoin, nous avons à titre indicatif simulé la FTSW pour 2 parcelles<sup>11</sup> sur 2016 (Figure 14). En effet, 2016 est l'année où les précipitations sur la période de croissance de la vigne ont été les plus faibles et donc les plus propices à une période de contrainte hydrique. La simulation de la FTSW entre 2014 et 2019 pour list et labr est présentée en Annexe 14. **La mise en place des PA ne modifie pas ou très peu le profil de la FTSW, donc ne génère pas de stress plus sévère pour la vigne que les Témoins** (Figure 14). On constate que sur une année avec de faibles précipitations, un stress hydrique sévère est atteint uniquement entre les mois de juillet et d'août, ce qui est considéré comme optimal pour le statut hydrique de la vigne (Pellegrino et al., 2006).

### III.2.3. Conséquence de la croissance des couverts sur les performances viticoles

Il existe une forte différence entre les quantités de MS produite des CS semées et des couverts spontanés sur les PA et les quantités de MS produites des couverts spontanés sur les Témoins (Figure 15). **En moyenne, il y a 6 fois plus de MS produite sur les traitements PA que sur les Témoins** (en moyenne 6.5 T/ha sur les PA et 0.47 T/ha sur les Témoins). La MS produite par les CS est significativement différente de la MS produite par les couverts spontanés (Figure 15). **Le semis de CS en PA permet donc de produire plus de MS (2.5 T/ha) que les couverts spontanés en PA et en Témoin (respectivement 0.55 T/ha et 0.47 T/ha)**. Néanmoins, la MS produite par les CS est plus variable que la MS produite par les couverts spontanés. La MS produite par les CS dépend de sa réussite d'implantation. On notera qu'en 2020 la production de MS a été plus importante que les années précédentes, mais également plus variable dans la réussite d'implantation des CS.

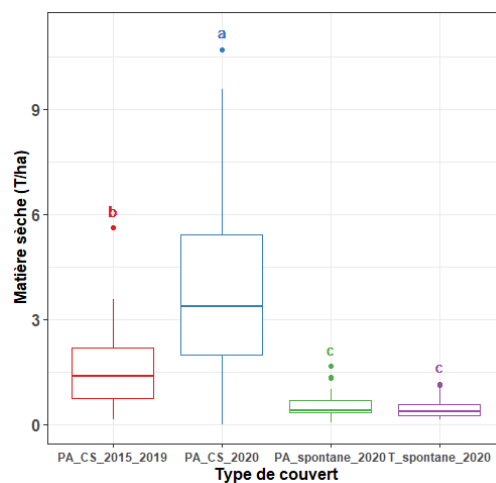


Figure 15 : Matière sèche en T/ha produite par les couverts sur les PA et les Témoins. PA\_CS\_2015\_2019 : CS sur les PA de 2015 à 2019, PA\_CS\_2020 : CS sur les PA en 2020, PA\_spontane\_2020 : couverts spontanés sur les PA en 2020, T\_spontane\_2020 : couverts spontanés sur les Témoins en 2020.

<sup>11</sup> Simulation sur ces 2 parcelles car les données d'ETPP étaient uniquement disponibles pour ces parcelles.

### III.3. Evaluation technico-environnementale de la mise en œuvre des pratiques alternatives

#### III.3.1. Evaluation de la charge de travail sur les différents traitements

Le temps de travail sur les traitements PA (entre 15 et 182 h/ha) est plus important que sur les Témoins (entre 12 et 130 h/ha) et il est également hétérogène en fonction des parcelles. **En moyenne, la mise en place des PA prend 15 h/ha de plus que les pratiques habituellement mises en place par les viticulteurs (Figure 16). L'implantation des couverts est l'intervention la plus chronophage (en moyenne 2.4 h/ha).**

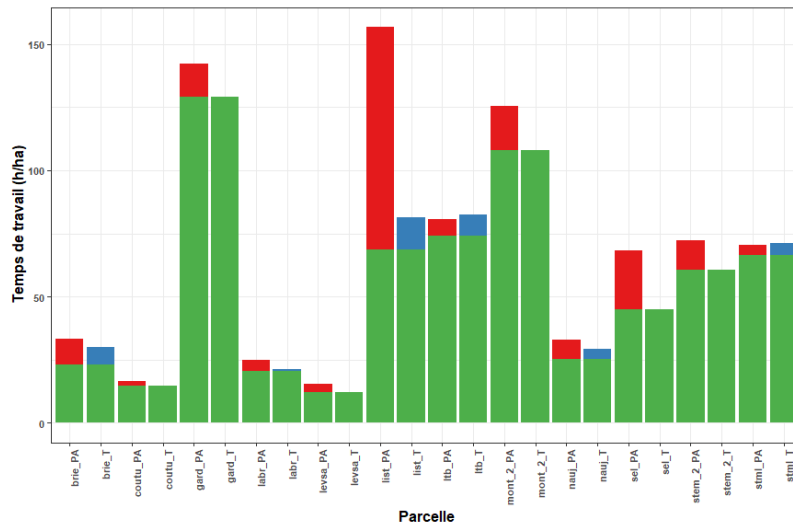


Figure 16 : Temps de travail en h/ha en fonction du traitement pour chaque parcelle pour l'année viticole 2018 (de l'implantation de la CS en 2017 à sa destruction en 2018). Sont représentés en vert le temps des interventions culturales appliquées sur la parcelle entière (temps égal sur les 2 traitements), en rouge le temps des interventions culturales appliquées uniquement sur le traitement PA et en bleu le temps des interventions culturales appliquées uniquement sur le traitement Témoin.

#### III.3.2. Evaluation des services fournis par la mise en place des pratiques alternatives

##### III.3.2.1. Service engrais vert des CV

La mise en place des PA vise principalement 3 services qui doivent être apportés par les CS : **l'effet mulch de couverture du sol, la restitution de minéraux par les engrais verts et la restitution de MO.** Le semis de CS sur les traitements PA permet, en moyenne après leur destruction, de restituer à la parcelle **16 kg/ha d'azote, 6 kg/ha de phosphore et 40 kg/ha de potassium** (Figure 17).

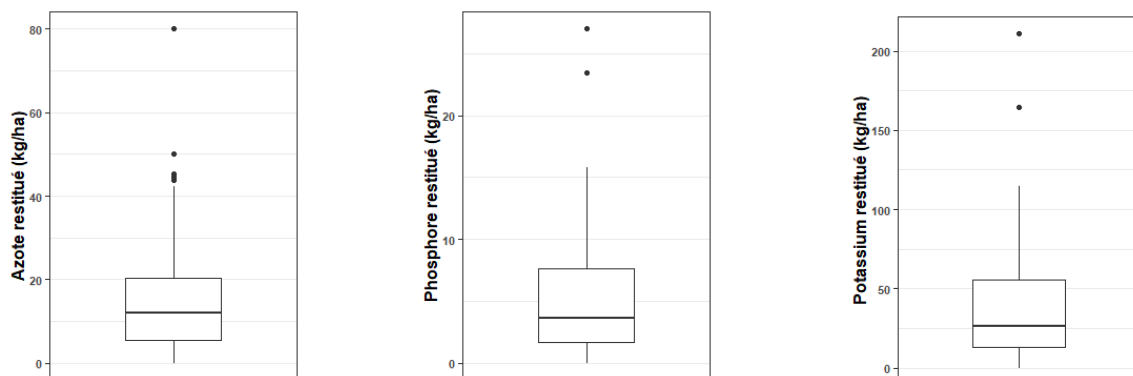


Figure 17 : Restitution estimée en azote, phosphore et potassium des CS sur les PA de 2015 à 2020.

Néanmoins, ces effets sont conditionnés à la nature du mélange d'espèces semées ainsi que de la réussite d'implantation du couvert. En effet, la variabilité des restitutions minérales est très importante avec des CV de 87% pour l'azote, de 94% pour le phosphore et de 96% pour le potassium. De plus, ces restitutions minérales étant calculées avec MERCI, il s'agit ici de potentiels de restitution. Ainsi, les restitutions pourraient être moindres en fonction des conditions de dégradation des résidus.

### III.3.2.2. Service d'entretien du stock de MO

Avec les pratiques mise en place sur les parcelles d'étude on constate une augmentation du niveau de MO sur les 5 années d'étude. Sur l'ensemble des parcelles, la restitution des sarments de vigne, coupés à l'automne, par broyage est une pratique largement répandue. **Cette intervention culturale permet d'avoir une augmentation de MO importante qui permet d'augmenter le stock de carbone du sol en moyenne de 18.3 T/ha sur 5 années, soit 3.7 T/ha/an** (Figure 18). La restitution totale des sarments est en moyenne de 4.5 T/ha/an. La restitution des sarments permet à elle seule de ne pas apporter d'amendements organiques supplémentaires pour l'entretien du stock de carbone. La restitution de la biomasse des CS est plus faible que celle des sarments. En moyenne, elle permet de restituer 0.5 T/ha/an, restitution 9 fois moins importante que celle des sarments (Figure 18). **La destruction des CS ne permet pas, dans la majorité des cas, d'augmenter le niveau de carbone d'initial du sol.** Néanmoins, on notera que pour les parcelles brie et coutu le niveau de carbone augmente avec la seule restitution des CS, ce sont des parcelles où le niveau de production de biomasse est important, respectivement 8.9 T/ha et 9.2 T/ha. **Avec les pratiques réellement mises en place sur les parcelles (restitution des sarments et de la biomasse des CS), les quantités de carbone des parcelles augmentent en moyenne de 20 T/ha en 5 ans** (Figure 18). Cette augmentation de carbone du sol ne semble pas dépendre du GPC d'appartenance de la parcelle.

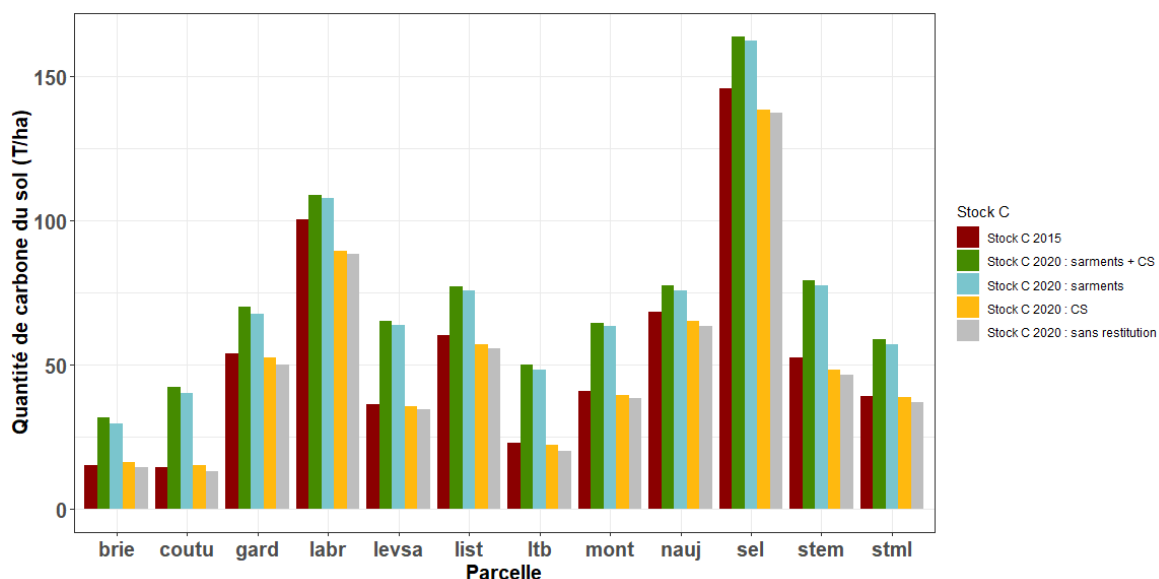


Figure 18 : Quantité de carbone du sol sur le traitement PA de chaque parcelle en 2015 (rouge), en 2020 avec restitution des sarments de vigne et de la biomasse des CS détruits (vert), en 2020 avec restitution des sarments de vigne (bleu), en 2020 avec restitution de la biomasse des CS détruits (jaune) et en 2020 sans aucune restitution de MO (gris).

### III.3.2.3. Service de couverture du sol

La mise en place des PA semble favoriser un taux de couverture plus important qu'avec un seul couvert spontané comme sur les Témoins, la moyenne de sol nu sur avec les PA est de 12.5% alors que sur les Témoins elle est de 16.7% (Figure 19). Néanmoins, **il n'y a pas de différence significative entre les taux de couverture**. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a aussi des couverts spontanés sur les Témoins et que l'installation des CS sur les PA n'est pas toujours réussie.

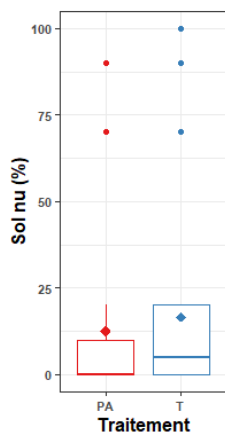


Figure 19 : Pourcentage de sol nu sur les traitements PA et Témoins sur 2018 et 2019. Les losanges correspondent aux moyennes sur les traitements correspondant.

### III.4. Bilan des résultats

Les effets de la mise en place des PA en contexte bordelais sont synthétisés dans le Tableau 13 et seront discutés dans la partie suivante.

Tableau 13 : Synthèse de l'ensemble des résultats sur l'effet de la mise en place des PA en réponse aux différentes sous questions abordées dans le mémoire.

Points de démarche	Résultats de la mise en place des PA
1	<u>Toutes parcelles confondues sur l'année 2019</u> : Les rendements et les poids de bois de taille ne sont pas significativement différents avec la mise en place des PA. (III.1.2)
	<u>Toutes parcelles confondues et toutes années confondues</u> : Les performances viticoles ne sont pas significativement différentes avec la mise en place des PA. (III.1.4)
2	<u>Toutes parcelles confondues</u> : Rendements plus stables avec la mise en place des PA. (III.1.3)
3	<u>Au sein de GPC homogènes</u> : Pas d'effet sur le rendement, la vigueur et les caractéristiques des baies. (III.1.5)
	<u>Au sein de GITK homogènes</u> : Pas d'effet sur les caractéristiques des baies. Risque de pertes de rendement et de vigueur de la vigne avec la mise en place de désherbage mécanique à forte fréquence (3 à 4 fois par an) sur le rang et l'inter-rang avec une forte densité de plantation. (III.1.6)
4	<u>Nutrition minérale</u> : Pas de compétition supplémentaire dans la nutrition minérale de la vigne générée par l'implantation de CS. (III.2.1)
	<u>Contrainte hydrique</u> : Peu de contrainte hydrique dans le bordelais et pas de compétition supplémentaire entre les CS et la vigne pour la ressource hydrique. (III.2.2)
	<u>Production de MS</u> : 6 fois plus de MS produite avec la mise en place des PA. En moyenne, les CS semées produisent 2.5 T/ha de MS en plus que les couverts spontanés. (III.2.3)
5a.	<u>Effet engrais vert</u> : En moyenne après destruction, les CS restituent 16 kg/ha de N, 6 kg/ha de P et 40 kg/ha de K. (III.3.2)
	<u>Restitution de MO</u> : En moyenne, les CS restituent 0.5 T/ha/an de MO à la parcelle. (III.3.2)
	<u>Couverture du sol</u> : Il n'y a pas de différence entre les traitements. (III.3.2)
5b.	<u>Temps de travail</u> : En moyenne, la mise en place des PA prend 15 h/ha de plus que les pratiques habituelles. L'implantation des CS est la plus chronophage des interventions culturales des PA avec en moyenne 2.4 h/ha. (III.3.1)

## IV. Discussion

Le but de ce mémoire est d'évaluer les effets de pratiques de gestion durable du sol (traitement PA) sur les performances viticoles et des services d'engrais vert, d'entretien du stock de MO, de couverture et d'amélioration de la qualité des sols rendus à la parcelle par rapport aux pratiques habituelles des viticulteurs bordelais (traitement Témoin) sur une période de 5 ans, dans un réseau de 14 parcelles.

### IV.1. Discussion des résultats

#### IV.1.1. Les PA ne modifient pas le niveau des performances viticoles

Il a été montré que **la mise en place des PA ne modifiait pas le niveau des performances viticoles**. Que ce soit pour le rendement, la vigueur de la vigne ou les caractéristiques des baies, les performances ne sont pas différentes de celles avec les pratiques habituelles des viticulteurs. Pour les deux traitements confondus, la plupart des rendements sont compris dans les gammes de production des appellations bordelaises, c'est-à-dire au plus bas avec 3.9 T/ha (norme AOP Sauternes) et 19.6 T/ha (norme IGP Atlantique) (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2019, 2016). Quelques valeurs de rendements se situent au-dessus ou au-dessous de ces références mais restent exceptionnels. Ceci peut notamment s'expliquer par le fait que la mise en place des PA ne génère pas de contrainte hydrique ou minérale supplémentaire pour la vigne. Même en considérant uniquement les performances de rendement et de poids de bois de taille au bout des 5 années d'étude, on ne constate pas de différence entre les traitements. Néanmoins, Ripoché et al. (2011) ont montré une différence dans les performances viticoles au bout de 2 années suite au changement des pratiques de gestion des sols viticoles. Avec les résultats au bout de 5 années de notre étude, nous n'avons pas été en mesure de montrer de telles modifications. De plus, ces résultats ne sont valables que par rapport aux pratiques Témoin de chaque viticulteur.

#### IV.1.2. Les PA fournissent des services à la parcelle viticole

D'après les résultats en III.1.5, les performances viticoles ne sont pas modifiées par la mise en place des PA. Les PA, même si elles génèrent plus de MS par l'implantation des CS, n'engendrent pas plus de compétition pour les ressources minérales car les analyses pétiolaires restent dans les normes pour le traitement PA (III.2.1). L'état hydrique de la vigne n'est pas non plus affecté par une compétition avec la MS supplémentaire produite par les CS (III.2.2). **Ainsi, toute la MS produite par les couverts (semés ou spontanés) n'apporte potentiellement que des services à la parcelle**. Ces avantages sont liés à la production de biomasse telles qu'une couverture du sol ou une restitution minérale plus importante.

##### IV.1.2.1. Service engrais vert des CS

Le but de la fertilisation en viticulture est de compenser l'exportation des minéraux de la vendange et la perte des minéraux (Delas, 2010). Il est important de souligner que dans le cadre d'une viticulture durable, la fertilisation ne doit pas contribuer à une vigueur trop excessive car cela risquerait de nuire à la qualité et à la typicité des vins (Delas, 2010). Le but est d'avoir un rendement et une vigueur les plus favorables à l'élaboration de la qualité des baies. **Nous avons montré que la destruction des CS restituait en moyenne 16 kg/ha d'azote, 6 kg/ha de phosphore et 40 kg/ha de potassium (estimation via l'outil MERCI)**. Plusieurs études montrent le même niveau de restitution en minéraux des CS (Couëdel et al., 2018; Perez-Alvarez et al., 2015). Cette restitution minérale représente pour le viticulteur une **économie de 47€/ha** s'il avait décidé d'avoir recours à une fertilisation minérale pour apporter les mêmes quantités de ces éléments minéraux en prenant comme prix à l'unité d'azote 1.14€, à l'unité de phosphore 0.72€ et à l'unité de potassium 0.62€ (Chambre d'Agriculture Auvergne, 2016).

Cette restitution minérale est néanmoins contrainte par le taux de réussite d'implantation des CS. Une utilisation optimisée des intrants rentre aussi dans la durabilité des pratiques, les PA permettent cette optimisation car elles permettent de réduire la quantité d'engrais minéral apportée.

#### IV.1.2.2. Entretien de la qualité des sols par les CS

**Nous avons montré que dans notre contexte, la restitution de MO par la destruction des CS ne permet pas de maintenir le niveau de MO du sol au cours des années.** Ceci est relié au fait que le coefficient isohumique des mélanges des CS est faible (graminées : 0.08, légumineuses : 0.10 et crucifères : 0.12) (Boiffin et al., 1986) et donc que peu de leur MS contribue à augmenter le stock de MO du sol. Une gestion durable doit aussi assurer une réserve de MO stable constante voire à la hausse. La mise en place des PA permet sur certaines parcelles de rehausser le niveau de MO par l'apport d'amendement organique restructurant mais **sur l'ensemble des parcelles la destruction de CS n'est pas suffisante pour permettre l'entretien du niveau de carbone du sol.** Cela montre que les pratiques habituellement mise en place dans le bordelais sont plutôt durables via la restitution des sarments de vigne. De plus, on constate fréquemment qu'il n'y a pas de changement entre les Témoins et les PA. Cela peut faire référence au fait que les PA ont des ITK proches des pratiques habituelles. Finalement, les pratiques habituelles dans le bordelais seraient déjà presque des pratiques de gestion durable des sols.

La qualité des sols sur les PA et les Témoins a aussi été évaluée avec la BOCQS sur des relevés sur 2018 et 2019. De ces données ont été tirés les services et dyservices apportés par la mise en place des PA ainsi que leur fréquence au sein des parcelles d'étude (Tableau 14).

*Tableau 14* : Fréquence des services et dyservices associés aux PA. La couleur des services et dyservices réfère à la fréquence d'apparition au sein des parcelles d'étude. Vert : fréquent (0.50 à 0.60), Bleu : peu fréquent (0.25 à 0.50), Violet : rare (0 à 0.25). S : Service, D : Dyservice, N : Neutre.

Caractéristiques du sol		Fréquence des services et dyservices identifiés
Etat structural	S	Augmentation des mottes grumeleuse Réduction du tassement, augmentation des mottes de type ouvert, limitation du phénomène d'hydromorphie, infiltration de l'eau améliorée
	D	Augmentation des mottes de type continu, réduction de la classe de densité
	N	Aucun changement entre les traitements
Matière organique humifère	S	Augmentation de la quantité de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Augmentation de la quantité de MO, diminution de la quantité de résidus
	N	Aucun changement entre les traitements
Activité biologique	S	Différenciation moins net des horizons Diversification des insecte présents, augmentation de la densité des racines de la vigne
	D	Diminution de la densité racinaire de la vigne Réduction de la diversité des insectes, réduction de la profondeur racinaire de la vigne, présence accrue de vers de terre
	N	Aucun changement entre les traitements
Enmoquettement	S	Augmentation de la profondeur racinaire du couvert, densité racinaire accrue du couvert
	N	Aucun changement entre les traitements

On retrouve des services avec la mise en place des PA qui permettent de qualifier ces pratiques de durables. En effet, l'un des objectifs de la gestion durable des sols vise à limiter la déstructuration des sols. Or, **on retrouve fréquemment une augmentation des mottes grumeleuses et ouvertes ainsi qu'une réduction du tassement avec la mise en place des PA notamment avec l'implantation des CS** (Guzmán et al., 2019; Le Bissonnais and Andrieux, 2007; Polge de Combret - Champart et al., 2013). Cette amélioration de la structure est liée à l'augmentation de la densité racinaire de la vigne et des couverts qui contribuent à décompacter le sol (Blanco-Canqui et al., 2015). L'infiltration de l'eau vise aussi à être améliorée avec la mise en place d'une gestion durable. On constate qu'avec l'implantation des CS, **l'infiltration de l'eau est améliorée**, comme montré par Celette et al. (2008) et que le phénomène hydromorphie est résolu assez fréquemment. Une gestion durable vise aussi à limiter l'érosion des sols ce qui est permis par une profondeur racinaire des CS plus importante sur les PA. **Au vu des améliorations constatées par la mise en place des PA, on peut conclure d'après les recommandations de la FAO (2017), que ces pratiques sont des pratiques de gestion durable du sol.**

Néanmoins, les pratiques déjà mises en place dans le bordelais (maintien de couverts spontanés dans les inter-rangs, entretien des couverts par tonte et désherbage majoritairement mécanique, restitution des bois de taille) sont plutôt durables, la mise en place des PA permet de les améliorer leur durabilité.

#### IV.1.3. Le temps de travail des PA est-il envisageable ?

**La différence de 15h/ha entre les traitements s'explique principalement par les opérations culturales supplémentaires que nécessitent les PA qui correspondent aux interventions relatives aux CS.** En effet, cela nécessite de préparer le sol pour leur implantation, de les semer puis de les détruire pour limiter la compétition avec la vigne. L'implantation des couverts est l'intervention la plus chronophage (en moyenne 2.4 h/ha), néanmoins, elle se situe sur la période pré ou post vendage (entre fin septembre et mi-octobre, avec quelques parcelles qui implantent leurs couverts début septembre). **Cette période d'implantation des CS n'entre donc pas en superposition avec d'autre pic de travail annuel au champs.** Pour les parcelles ltb et stml pour lesquelles les temps de travail sont légèrement plus élevés sur les Témoins, cela correspond à 1 intervention culturale supplémentaire, respectivement un désherbage mécanique de l'inter-rang et une tonte du rang. Pour la parcelle list, le temps de travail est beaucoup plus important dû à de nombreuses interventions de désherbage mécanique de l'inter-rang. En effet, un semis réalisé en 2010 de fétuque rouge gazonnante était devenu très envahissant, ceci a nécessité sa destruction et donc un nombre important d'interventions. **La mise en place des PA nécessite plus de temps de travail que la réalisation des pratiques habituelles.** Néanmoins, le temps de travail global habituel pour une parcelle viticole bordelaise est de 92h/ha (Chambre d'Agriculture Gironde, 2018). Or, la quasi-totalité des parcelles d'étude ont un temps de travail moindre par rapport à la moyenne de travail bordelaise, la moyenne de temps de travail des parcelles d'étude étant de 38h/ha. La hausse du temps de travail pour la mise en place des PA est d'environ 20% par rapport au temps de travail des pratiques habituelles (sans compter le temps de travail exceptionnel en 2018 sur list et les parcelles ltb et stml où le temps de travaux sont plus faibles sur les PA en moyenne de 2%). **Ce faible temps de travail supplémentaire imposé par les PA peut représenter un argument pour leur adoption par les viticulteurs, il est envisageable qu'ils puissent accepter cette charge supplémentaire.**

#### IV.1.4. Représentativité des groupes de parcelles homogènes sur lesquels l'effet de la mise en place des PA a été testée

##### IV.1.4.1. Représentativité des groupes homogènes pédoclimatiques au sein du vignoble bordelais

Notre étude a montré l'effet prépondérant des caractéristiques pédoclimatiques des parcelles sur les performances viticoles, en accord avec d'autres études conduites sur les terroirs bordelais

(Renouf et al., 2010; Van Leeuwen and Seguin, 2006). La classification des parcelles en GPC permet d'appréhender la diversité des grands terroirs viticoles du bordelais : les sols argilo calcaires (GPC\_1), les sols avec des quantités importantes de limons : les boubènes (GPC\_2) et les sols sablo graveleux acides (GPC\_3). **Toutefois, nous avons montré qu'il n'y avait pas d'effet de la mise en place des PA sur les performances viticoles quel que soit le groupe pédoclimatique concerné.** Cela rejoint les résultats Renouf et al. (2010) qui montrent que le rendement et la qualité des baies dépendent d'une interaction entre le sol, le cépage et le porte-greffe. Cette conclusion peut conduire à favoriser le développement de ce genre de pratiques à l'échelle du bassin bordelais, sans avoir d'effets négatifs sur les performances dans la gamme des valeurs observées et pour les climats considérés.

#### IV.1.4.2. Représentativités des groupes homogènes d'ITK au sein du vignoble bordelais

La réalisation des GITK a mené à des groupes avec de faibles effectifs (GITK\_1 et GITK\_2). Néanmoins, **ces groupes sont représentatifs des pratiques mises actuellement en place au sein du vignoble bordelais** (Lorelei Cazenave, communication personnelle). En moyenne, seul 6% du vignoble national est enherbé sous le rang (Agreste, 2019) ce qui est relativement faible. Sur les parcelles d'étude, la tonte sous le rang n'est réalisée que sur 2 demies parcelles (nauj\_PA et stml\_T) reflétant de la marginalité de cette pratique. La tonte sous le rang tend à se développer de plus en plus avec l'obligation de l'arrêt du désherbage chimique d'ici 2022, cette pratique représente une alternative aux herbicides envisageable (Gontier et al., 2013). On constate qu'il y a 75% des parcelles d'étude utilisant du travail mécanique (parfois avec une fréquence élevée) sans utilisation de désherbage chimique. Les parcelles qui constituent ces groupes sont dans les plus novatrices du vignoble bordelais sur les pratiques de désherbage uniquement mécanique. En effet, les parcelles utilisant seulement du désherbage mécanique représentent 12% du vignoble bordelais (Agreste, 2019) alors que 75% des parcelles de l'étude utilisent seulement du désherbage mécanique.

**Même si le nombre de parcelles est différent entre les groupes, on constate des différences entre les parcelles avec des enherbements totaux (GITK\_1) et les parcelles avec des enherbements uniquement sur l'inter-rang (GITK\_2, GITK\_3 et GITK\_4).** Avec un enherbement total, on constate un rendement, une vigueur et un taux d'azote assimilable plus faibles et une concentration en polyphénols plus importante, ces résultats corroborent ceux trouvés par Gontier et al. (2013).

## IV.2. Discussion des méthodes

### IV.2.1. Différences entre les traitements de gestion de parcelle

Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence entre les traitements PA et Témoins. Néanmoins ceci pourrait s'expliquer par le fait que **les différences de pratiques entre les traitements sont relativement faibles.** Ces différences portent sur la gestion extensive des couverts spontanés, le semis de CS, l'apport de MO restructurante et la tonte sous le rang. En se basant sur l'hypothèse que les interventions culturales de 2018 sont représentatives des pratiques réalisées pendant l'ensemble du projet VERTIGO, on ne constate que peu de différence sur la gestion des couverts spontanés entre PA et Témoins (même fréquence de travail et même type d'entretien). La pratique de tonte sous le rang n'est mise en place que sur deux demies parcelles dont une sur un Témoin. L'apport de MO restructurante a été mise en place une fois sur 6 ans sur uniquement 5 parcelles. Nous avons donc des traitements qui diffèrent peu dans les pratiques mises en place. **La différence majeure entre les traitements est le semis de CS qui est mis en place sur l'ensemble des PA et sur aucun des Témoins.** Les essais étant réalisés en parcelles commerciales, il est parfois difficile pour les agriculteurs de mettre en place certaines pratiques et de les maintenir tout le temps en fonction des aléas.



### IV.2.2. Modélisation du niveau de contrainte hydrique de la vigne

La modélisation de la FSTW a été effectuée afin d’appréhender le niveau de contraintes hydriques sur les parcelles bordelaises. En effet, il n’y a pas eu au cours du projet VERTIGO de mesures sur la vigne permettant d’évaluer le stress hydrique sur la parcelle. **Cette modélisation n’a pas permis pas de prendre finement en compte la nature des couverts, spontanés ou semés.** Les paramètres relatifs à l’évaporation du sol n’ont pas été adaptés au contexte bordelais.

### IV.2.3. Faible puissance statistique *a posteriori* pour évaluer l’effet du traitement

La puissance *a posteriori* permet d’estimer avec quelle certitude les tests statistiques réalisés sont fiables pour montrer l’effet d’un facteur donné sur une variable à expliquer. Dans ce mémoire, les puissances *a posteriori* ont été calculées afin de voir si l’effet non significatif est dû à un effet négligeable ou bien à une taille d’effet et un nombre de répétitions faibles (Bourque et al., 2009). **Les puissances *a posteriori* sont faibles** (Tableau 15). Avec le dispositif et les mesures réalisées, il y a 22%, 15% et 12% de chance de montrer que la mise en place des PA a réellement un effet sur respectivement le rendement, le poids pétiolaire et l’azote assimilable si les PA ont vraiment un effet. De même le poids de bois de taille, le poids des baies, la concentration en polyphénols, en anthocyanes et en sucres, avec des ordres de grandeur de 5% de chance de montrer un effet.

Tableau 15 : Puissance *a posteriori* calculée pour chaque performance viticole sur les modèles linéaires sélectionnés utilisés au sein des GPC.

Variables	Taille d’effet <sup>12</sup>	Puissance <i>a posteriori</i>
Rendement (T/ha)	0.07	0.22
Poids de bois de taille (T/ha)	4.95 <sup>E</sup> -3	0.05
Poids pétiolaire (g)	0.09	0.15
Poids des baies (g)	0.02	0.05
Azote assimilable (mg/g)	0.10	0.12
Concentration en polyphénols	4.47 <sup>E</sup> -3	0.05
Concentration d’anthocyanes (mg/L)	0.03	0.06
Concentration en sucres (g/L)	0.02	0.05

Du fait de la faible puissance *a posteriori*, **il faut donc prendre avec précaution les résultats présentés dans ce mémoire.** En effet, peut être que la mise en place des PA a un effet sur les performances viticoles mais que le dispositif ne permet de mettre en évidence cet effet.

## IV.3. Perspectives

### IV.3.1. Augmenter la puissance statistique : analyse *a priori* de la puissance

Le projet VERTIGO a pris fin cette année mais le projet VERTIGO II est en cours de design expérimental. Augmenter la puissance statistique des tests afin de voir si la mise en place des PA a un effet ou non sur les performances viticoles constitue un axe d’amélioration intéressant pour le nouveau projet. **Une analyse de la puissance *a priori* a été menée afin de savoir le nombre de répétitions nécessaires pour obtenir une puissance acceptable** (Bourque et al., 2009). D’après le Tableau 15, le rendement semble être la variable qui soit la plus propice à avoir une puissance statistique élevée. Le rendement est donc propice à présenter des résultats robustes quant au réel effet de la mise en place des PA. Nous allons donc chercher à obtenir une puissance statistique importante pour le rendement, voir combien de répétitions cela demande et si cela est réalisable, calculer la puissance que l’on obtiendrait avec ce nombre de répétitions pour les autres performances.

<sup>12</sup> La taille d’effet représente à quel degré un phénomène donné est présent dans la population (Bourque et al., 2009). Plus la taille d’effet sera grande plus il sera justifié d’accepter le résultat de la significativité ou non du traitement.

En fixant **une puissance a priori de 80%** pour le rendement, cela demande 816 mesures sur un traitement soit 1 632 en tout sur la durée de VERTIGO II (sur 3 ans soit 544 mesures par an pour les deux traitements). Il y aura 12 parcelles commerciales suivies, donc ceci représente **46 pieds par parcelle dont le rendement est mesuré par pieds (soit 23 par traitement)**. La puissance a été calculée pour les autres performances en fonction des répétitions pour le rendement, on considère donc que le même nombre de pieds seront suivis individuellement pour les autres performances (Tableau 16). Néanmoins, les mesures réalisées par pieds ne pourront être effectuées que sur les mesures faites par la CA33, c'est-à-dire le rendement, le poids de bois de taille, le poids pétiolaire et le poids des baies. En effet, les mesures d'azote assimilable et des concentrations en polyphénols, en anthocyane et en sucre étant réalisés par des prestataires extérieurs, cela augmenterait trop le budget de VERTIGO II. La puissance pour ces variables ne pourra donc pas augmenter avec VERTIGO II. Afin d'estimer la puissance statistique pour les variables mesurées au pieds, on estime que la taille d'effet sera proche de celle de VERTIGO I afin de pouvoir calculer la puissance *a posteriori*.

Tableau 16 : Résultats de l'analyse *a priori* sur le rendement pour déterminer la puissance statistique qui en découle sur le poids de bois de taille, le poids pétiolaire et le poids des baies.

Variables	Puissance statistique	Nombre de mesures à réaliser sur la durée totale du projet
Rendement (T/ha)	0.80	1 632
Poids de bois de taille (T/ha)	0.05	1 632
Poids pétiolaire (g)	0.94	1 632
Poids des baies (g)	0.09	1 632

Il est normal que la puissance statistique des poids de bois de taille ne soit pas augmentée. En effet, sa taille d'effet étant très faible, il sera difficile de détecter l'effet de la mise en place des PA sur cette variable. **Avec des mesures par pieds, on arrive à des puissances statistiques élevées (supérieure ou égale à 80%) pour le rendement et le poids pétiolaire.** Avec l'augmentation du nombre de mesures, on pourra ainsi conclure avec plus de robustesse sur l'effet de la mise en place des PA sur le rendement et la vigueur de la vigne.

#### IV.3.2. Adoption des pratiques de gestion durable du sol par les agriculteurs

L'ambition majeure du projet VERTIGO est de développer la mise en place de pratiques de gestion du sol plus durables au sein du vignoble bordelais. Pour cela il faut des arguments pour que les viticulteurs soient convaincus de l'intérêt de ces pratiques et décident de les mettre en place sur leurs parcelles. **L'argument principal est qu'il n'y a pas d'effet de la mise en place des pratiques durables sur les performances viticoles par rapport à leurs pratiques habituelles.** En effet, l'étude d'Aouadi et al. (2019) montre que le changement de mode de conduite et de pratiques des viticulteurs bordelais sont favorisés si la rentabilité du système viticole est maintenue. La modification principale engendrée par les pratiques durables est le semi de CS. Cette pratique nécessite **un temps de travail plus important, en moyenne 20%, qui peut être envisageable par les viticulteurs** car le semis (en général en post-vendange) et leur destruction (en général à la fin du printemps) ne se superposent pas avec d'autres pics de travail annuels au champs. De plus, **le bordelais est une région viticole où l'enherbement des inter-rangs est une pratique bien développée avec 82% du vignoble enherbé** (Agreste, 2019). La pratique de mise en place de CS paraît donc plus acceptable par les viticulteurs dans ce contexte. Les résultats de ce mémoire ont permis de mettre en avant les bénéfices et la faisabilité de la mise en place de pratiques de gestion du sol plus durables. Néanmoins, les changements de pratiques ne sont pas seulement d'ordre technique, la nature sociale de ces techniques doit aussi être prise en considération afin de prédire leur adoption par les viticulteurs bordelais (Compagnone, 2004).

## V. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en avant que la mise en place de pratiques de gestion durable des sols (tonte extensive, semis de CS, apport d'amendement organique restructurant) n'avait pas d'effet sur les performances viticoles (rendement, vigueur et caractéristiques des baies) par rapport aux pratiques déjà mises en place par les viticulteurs bordelais sur une durée d'étude de 5 années sur un réseau de 14 parcelles. Les rendements sont plus stables sur les parcelles où les pratiques de gestion durable ont été mises en place.

Des groupes homogènes de parcelles ont pu être identifiés afin de voir si la mise en place de ces pratiques avait un effet différent selon plusieurs caractéristiques. Il en ressort que les pratiques de gestion durable n'ont pas d'effet différent sur les performances viticoles selon les caractéristiques pédoclimatiques des parcelles. En fonction des pratiques réalisées sur les parcelles, les caractéristiques des baies ne varient pas. Néanmoins, il y a un risque de perte de rendement et de vigueur de la vigne si le vignoble a une forte densité de plantation et que des désherbages mécaniques sur l'inter-rang sont réalisés avec une forte fréquence (3 à 4 fois par an).

La mise en place des CS permet d'apporter de nombreux services écosystémiques à la parcelle dont les principaux sont la couverture du sol, la restitution de minéraux et une amélioration de la qualité des sols (amélioration de la structure, meilleure infiltration de l'eau). Les CS provoquant peu de stress hydrominéral vis-à-vis de la vigne, ils apportent donc peu de dyservices.

Un des buts premiers du projet VERTIGO est d'étendre les pratiques de gestion durable au sein du vignoble bordelais. De nombreux arguments sont en faveur de la mise en place de ces pratiques au niveau environnemental (beaucoup de services écosystémiques rendus à la parcelle), socio-technique (peu de temps de travail en plus comparé aux pratiques habituelles) et des performances du système (pas d'effet sur les performances viticoles). On notera tout de même que les pratiques habituelles bordelaises présentes sur les parcelles d'étude (Témoin) sont déjà assez durables mais que les pratiques proposées par le projet ont pour objectif de les améliorer.

L'augmentation du nombre de répétitions prévue pour la suite du projet VERTIGO II, notamment la mesure au pieds du rendement et de la vigueur, va permettre d'augmenter la puissance statistique. Cela permettra au projet d'apporter des conclusions plus robustes quant à l'effet de la mise en place des pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles. Augmenter la durée de l'étude de 3 années permettra aussi d'augmenter la robustesse des résultats.

## Bibliographie

- Agnelli, A., Bol, R., Trumbore, S.E., Dixon, L., Cocco, S., Corti, G., 2014. Carbon and nitrogen in soil and vine roots in harrowed and grass-covered vineyards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 193, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.023>
- Agreste, 2020. La filière viti-vinicole girondine au premier rang national de la viticulture d'appellation. [http://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Infographie\\_viti-gironde-Correctif\\_\\_cle061a17-1.pdf](http://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Infographie_viti-gironde-Correctif__cle061a17-1.pdf)
- Agreste, 2019. Graph'Agri 2019 - Pratiques de culture 27–33. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFraChap3.1/Graf1910%20-%20Pratiques%20culturales.pdf>
- Alim'Agri, 2018. Infographie - La viticulture [WWW Document]. URL <https://agriculture.gouv.fr/infographie-la-viticulture>
- Aouadi, N., Macary, F., Ugaglia, A.A., 2019. Evaluation des performances socio-économiques et environnementales de systèmes viticoles en bordelais par une méthode multicritère d'aide à la décision 13.
- Archambeaud, M., Minette, S., 2010. Mesurez les éléments minéraux dans vos couverts. *Tech. Cult. Simpl.* 3.
- Benito, A., Romero, I., Domínguez, N., García-Escudero, E., Martín, I., 2013. Leaf blade and petiole analysis for nutrient diagnosis in *Vitis vinifera* L. cv. Garnacha tinta: Leaf nutritional diagnosis for Garnacha tinta vines. *Aust. J. Grape Wine Res.* 19, 285–298. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12022>
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A., Hergert, G.W., 2015. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agron. J.* 107, 2449–2474. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0086>
- Bodner, G., Loiskandl, W., Kaul, H.-P., 2007. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *Agric. Water Manag.* 93, 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.06.010>
- Boiffin, J., Kéli Zagbahi, J., Sebillotte, M., 1986. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie* 6, 437–446. <https://doi.org/10.1051/agro:19860503>
- Bourque, J., Blais, J.-G., Larose, F., 2009. L'interprétation des tests d'hypothèses : p, la taille de l'effet et la puissance. *Rev. Sci. Léducation* 35, 211–226. <https://doi.org/10.7202/029931ar>
- Carbonneau, A., Torregrosa, L., 2020. *Traité de la vigne*, 3ème. ed. Dunod.
- Celette, F., Findeling, A., Gary, C., 2009. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *Eur. J. Agron.* 30, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.07.003>
- Celette, F., Gary, C., 2013. Dynamics of water and nitrogen stress along the grapevine cycle as affected by cover cropping. *Eur. J. Agron.* 45, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.001>
- Celette, F., Gaudin, R., Gary, C., 2008. Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *Eur. J. Agron.* 29, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007>
- Celette, F., Ripoche, A., Gary, C., 2010. WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agric. Water Manag.* 97, 1749–1759. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>
- Chambre d'Agriculture Auvergne, 2016. *Gude régional de fertilisation - Prairies et cultures fourragères*.
- Chambre d'Agriculture Gironde, 2018. *Référentiel économique du vigneron 2018 - Vignoble de Bordeaux*.

- Cheng, X., Baumgartner, K., 2004. Arbuscular mycorrhizal fungi-mediated nitrogen transfer from vineyard cover crops to grapevines. *Biol. Fertil. Soils* 40, 406–412. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0797-4>
- Clingeffer, P.R., 2010. Plant management research: status and what it can offer to address challenges and limitations. *Aust. J. Grape Wine Res.* 16, 25–32. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00075.x>
- Cohen, J., 1988. *Statistical Power Analysis for the behavioral sciences*, Psychology.
- Coll, P., Le Cadre, E., Blanchart, E., Hinsinger, P., Villenave, C., 2011. Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. *Appl. Soil Ecol.* S0929139311001570. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.013>
- Collaud, G., 2014. Fertilité à long terme - Matière organique et entretien du stock d'humus dans les sols. *Rev. UFA* 42–45.
- Compagnone, C., 2004. Agriculture raisonnée et dynamique de changement en viticulture bourguignonne 20.
- Coombe, B.G., McCarthy, M.G., 2000. Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6, 131–135. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00171.x>
- Couëdel, A., Alletto, L., Tribouillois, H., Justes, É., 2018. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agric. Ecosyst. Environ.* 254, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.017>
- Coulouma, G., Boizard, H., Trotoux, G., Lagacherie, P., Richard, G., 2006. Effect of deep tillage for vineyard establishment on soil structure: A case study in Southern France. *Soil Tillage Res.* 88, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.05.002>
- Daane, K.M., Hogg, B.N., Wilson, H., Yokota, G.Y., 2018. Native grass ground covers provide multiple ecosystem services in Californian vineyards. *J. Appl. Ecol.* 55, 2473–2483. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13145>
- Daily, G., 1997. *Nature's services : societal dependence on natural ecosystems*, Island Press. ed.
- Dami, I., 2005. *Grape Petiole Analysis* 3.
- Delas, J., 2010. *Ferlisation de la vigne, 2ème. ed*, Usuels Féret de la Vigne et du Vin. Féret.
- Dominguez, N., García-Escudero, E., Romero, I., Benito, A., Martín, I., 2015. Leaf blade and petiole nutritional evolution and variability throughout the crop season for *Vitis vinifera* L. cv. Graciano. *Span. J. Agric. Res.* 13, e0801. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015133-5142>
- dos Santos, T.P., Lopes, C.M., Lucília Rodrigues, M., de Souza, C.R., Ricardo-da-Silva, J.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S., Manuela Chaves, M., 2007. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Sci. Hortic.* 112, 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.01.006>
- Dumanski, J., 2004. Carbon Sequestration, Soil Conservation, and the Kyoto Protocol: Summary of Implications. *Clim. Change* 65, 255–261. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000038210.66057.61>
- FAO, 2017. *Directives volontaires pour une gestion durable des sols*.
- Ferrero, A., Usowicz, B., Lipiec, J., 2005. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. *Soil Tillage Res.* 84, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.003>
- Finney, D.M., White, C.M., Kaye, J.P., 2016. Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. *Agron. J.* 108, 39–52. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>
- Fourie, J.C., 2012. Soil Management in the Breede River Valley Wine Grape Region, South Africa. 4. Organic Matter and Macro-nutrient Content of a Medium-textured Soil. *South Afr. J. Enol. Vitic.* 33. <https://doi.org/10.21548/33-1-1312>
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoché, A., Valdés-Gómez, H., Metay, A., 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 251, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>

- Garcia, L., Damour, G., Gary, C., Follain, S., Le Bissonnais, Y., Metay, A., 2019. Trait-based approach for agroecology: contribution of service crop root traits to explain soil aggregate stability in vineyards. *Plant Soil* 435, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3874-4>
- García-Díaz, A., Bienes, R., Sastre, B., Novara, A., Gristina, L., Cerdà, A., 2017. Nitrogen losses in vineyards under different types of soil groundcover. A field runoff simulator approach in central Spain. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 256–267. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.013>
- García-Ruiz, J.M., 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *CATENA* 81, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.001>
- Gaudin, R., Kansou, K., Payan, J.-C., Pellegrino, A., Gary, C., 2014. A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield. *OENO One* 48, 1. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.1.1655>
- Germain, C., Duron, B., 2009. Fertilisation de la vigne en Champagne - Usage de produits organiques.
- Giese, G., Velasco-Cruz, C., Roberts, L., Heitman, J., Wolf, T.K., 2014. Complete vineyard floor cover crops favorably limit grapevine vegetative growth. *Sci. Hortic.* 170, 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.011>
- Gontier, L., Gaviglio, C., Dufourcq, T., 2013. Enherbement maîtrisé sous le rang : intérêt technique pour différentes productions de vin du Sud-Ouest 3.
- Goulet, E., Dousset, S., Chaussod, R., Bartoli, F., Doledec, A.F., Andreux, F., 2004. Water-stable aggregates and organic matter pools in a calcareous vineyard soil under four soil-surface management systems. *Soil Use Manag.* 20, 318–324. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00376.x>
- Guilpart, N., 2014. Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes : compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oïdium. Montpellier SupAgro.
- Guilpart, N., Metay, A., Gary, C., 2014. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *Eur. J. Agron.* 54, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.002>
- Guzmán, G., Cabezas, J.M., Sánchez-Cuesta, R., Lora, Á., Bauer, T., Strauss, P., Winter, S., Zaller, J.G., Gómez, J.A., 2019. A field evaluation of the impact of temporary cover crops on soil properties and vegetation communities in southern Spain vineyards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 272, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.11.010>
- Hartwig, N.L., Ammon, H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50, 688–699. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0688:AIACCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0688:AIACCA]2.0.CO;2)
- Hénin, S., Dupuis, M., 1945. Essai de bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agron.* 15, 161–172.
- INAO, 2018. Les produits sous signe d'identification de la qualité et de l'origine - Chiffres-clés 2018. [https://doi.org/file:///C:/Users/pvd/AppData/Local/Temp/INAO\\_CH\\_CLE\\_2019\\_BD-1.pdf](https://doi.org/file:///C:/Users/pvd/AppData/Local/Temp/INAO_CH_CLE_2019_BD-1.pdf)
- ITAB, 2012. Couverts végétaux pendant l'interculture en AB : Caractéristiques des espèces.
- Kapfer, D., 2018. Elaboration d'outils d'aide à l'interprétation de la qualité des sols pour suivre l'impact d'un itinéraire de gestion durable des sols viticoles : la "BOCQS."
- Keller, M., Tarara, J.M., 2010. Warm spring temperatures induce persistent season-long changes in shoot development in grapevines. *Ann. Bot.* 106, 131–141. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq091>
- Lamanda, N., Roux, S., Delmotte, S., Merot, A., Rapidel, B., Adam, M., Wery, J., 2012. A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. *Eur. J. Agron.* 38, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.004>
- Le Bissonnais, Y., Andrieux, P., 2007. Impact des modes d'entretien de la vigne sur le ruissellement, l'érosion et la structuration des sols : Mécanismes et résultats expérimentaux. *Prog. Agric. Vitic.* 124, 191–196.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018. Plan Ecophyto II+.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2019. Cahier des charges de l'IGP Atlantique.

- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2016. Cahier des charges de l'Appellation d'Origine Contrôlée "Sauternes."
- Mira de Orduña, R., 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* 43, 1844–1855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
- Nicolardot, B., 2016. Matière organique des sols : un bien essentiel à gérer - Matinée technique du BIVB.
- Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., Deloire, A., 2002. Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Am. J. Enol. Vitic.* 53, 261–267.
- Ojeda, H., Deloire, A., Carbonneau, A., 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40, 141–145.
- Pellegrino, A., Gozé, E., Lebon, E., Wery, J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *Eur. J. Agron.* 25, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.03.003>
- Pellegrino, A., Lebon, E., Simonneau, T., Wery, J., 2005. Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Aust. J. Grape Wine Res.* 11, 306–315. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00030.x>
- Perez-Alvarez, E.P., Garcia-Escudero, E., Peregrina, F., 2015. Soil Nutrient Availability under Cover Crops: Effects on Vines, Must, and Wine in a Tempranillo Vineyard. *Am. J. Enol. Vitic.* 66, 311–320. <https://doi.org/10.5344/ajev.2015.14092>
- Peyrot des Gachons, C., Leeuwen, C.V., Tominaga, T., Soyer, J.-P., Gaudillère, J.-P., Dubourdieu, D., 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions: Influence of water and nitrogen deficit on grape aroma potential. *J. Sci. Food Agric.* 85, 73–85. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1919>
- Polge de Combret - Champart, L., Guilpart, N., Mérot, A., Capillon, A., Gary, C., 2013. Determinants of the degradation of soil structure in vineyards with a view to conversion to organic farming. *Soil Use Manag.* 29, 557–566. <https://doi.org/10.1111/sum.12071>
- Poni, S., Bernizzoni, F., Civardi, S., 2007. Response of "Sangiovese" grapevines to partial root-zone drying: Gas-exchange, growth and grape composition. *Sci. Hortic.* 114, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.06.003>
- Renouf, V., Trégoat, O., Roby, J.-P., Van Leeuwen, C., 2010. Soils, rootstocks and grapevine varieties in prestigious Bordeaux vineyards and their impact on yield and quality. *OENO One* 44, 127. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2010.44.3.1471>
- Ripoche, A., Celette, F., Cinna, J.-P., Gary, C., 2010. Design of intercrop management plans to fulfil production and environmental objectives in vineyards. *Eur. J. Agron.* 32, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.05.005>
- Ripoche, A., Metay, A., Celette, F., Gary, C., 2011. Changing the soil surface management in vineyards: immediate and delayed effects on the growth and yield of grapevine. *Plant Soil* 339, 259–271. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0573-1>
- Rosa, J.D., Mafra, A.L., Medeiros, J.C., Albuquerque, J.A., Miquelluti, D.J., Nohatto, M.A., Ferreira, E.Z., Oliveira, O.L.P. de, 2013. Soil physical properties and grape yield influenced by cover crops and management systems. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 37, 1352–1360. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500024>
- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., Eldridge, D.J., Marques, M.J., 2013. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *CATENA* 104, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.007>
- Salomé, C., Coll, P., Lardo, E., Metay, A., Villenave, C., Marsden, C., Blanchart, E., Hinsinger, P., Le Cadre, E., 2016. The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards. *Ecol. Indic.* 61, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.047>
- Sánchez, L.A., Dokoozlian, N.K., 2005. Bud Microclimate and Fruitfulness in *Vitis vinifera* L. 11.

- Sulas, L., Mercenaro, L., Campesi, G., Nieddu, G., 2017. Different Cover Crops Affect Nitrogen Fluxes in Mediterranean Vineyard. *Agron. J.* 109, 2579–2585. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0283>
- Thomas, F., Archambeaud, M., 2016. Les couverts végétaux - Gestion pratique de l'interculture, France Agricole. ed, Agriproduction.
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J., Jensen, L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 227–302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)79005-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79005-6)
- Tonietto, J., Carbonneau, A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agric. For. Meteorol.* 124, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>
- Tonitto, C., David, M.B., Drinkwater, L.E., 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.07.003>
- Valdés-Gómez, H., Gary, C., Cartolaro, P., Lolas-Caneo, M., Calonnec, A., 2011. Powdery mildew development is positively influenced by grapevine vegetative growth induced by different soil management strategies. *Crop Prot.* 30, 1168–1177. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.05.014>
- Van Leeuwen, C., Friant, P., Soyer, J.-P., Molot, Ch., Choné, X., Dubourdieu, D., 2000. Measurement of total nitrogen and assimilable nitrogen in grape juice to assess vine nitrogen status. *OENO One* 34, 75. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2000.34.2.1010>
- Van Leeuwen, C., Seguin, G., 2006. The concept of terroir in viticulture.
- Vasconcelos, M.C., Greven, M., Winefield, C.S., Trought, M.C.T., Raw, V., 2009. The Flowering Process of *Vitis vinifera*: A Review 24.
- Veiga, M. da, Feldberg, N.P., Nava, G., Bettoni, J.C., 2017. Winter cover crops affecting physical and chemical soil attributes in a commercial vineyard. *Ciênc. Rural* 47. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160827>
- Vrignon-Brenas, S., Celette, F., Piquet-Pissaloux, A., Jeuffroy, M.-H., David, C., 2016. Early assessment of ecological services provided by forage legumes in relay intercropping. *Eur. J. Agron.* 75, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.011>
- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Úrbez-Torres, J.R., Hart, M., 2016. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0385-7>
- White, C.M., DuPont, S.T., Hautau, M., Hartman, D., Finney, D.M., Bradley, B., LaChance, J.C., Kaye, J.P., 2017. Managing the trade off between nitrogen supply and retention with cover crop mixtures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 237, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.016>
- Wilkie, J.D., Sedgley, M., Olesen, T., 2008. Regulation of floral initiation in horticultural trees. *J. Exp. Bot.* 59, 3215–3228. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern188>



## Liste des annexes

**Annexe 1 : Références pour l'interprétation des analyses pétiolaires issues de la bibliographie de plusieurs études.**

**Annexe 2 : Stations météorologiques.**

**Annexe 3 : Sélection des variables pour caractériser les baies.**

**Annexe 4 : Paramétrisation de WaLIS pour la simulation de la FTSW de la vigne sur les parcelles list et labr.**

**Annexe 6 : Performances viticoles en fonction du traitement, de l'année et de la parcelle.**

**Annexe 7 :  $\Delta_{performances}$  en fonction du traitement, de l'année et de la parcelle.**

**Annexe 8 : Résultats des p-values des modèles linéaires sélectionnés explicatifs de chaque performance viticole.**

**Annexe 9 :  $R^2$  totaux des modèles linéaires sélectionnés pour l'explication des variations de  $\Delta_{performances}$  et des valeurs brutes.**

**Annexe 10 : Typologie de parcelles basée sur des milieux pédoclimatiques homogènes.**

**Annexe 11 : Performances viticoles par GPC et traitements.**

**Annexe 12 : Typologie de parcelles basée sur des mises en œuvre de pratiques homogènes.**

**Annexe 13 : Performances viticoles par GITK.**

**Annexe 14 : Caractérisation climatique mensuelle des parcelles sur les années d'étude.**

**Annexe 14 : Modélisation de la FSTW de la vigne par WaLIS pour les parcelles list et labr entre 2014 et 2019.**

## Annexes

### Annexe 1 : Références pour l'interprétation des analyses pétiolaires issues de la bibliographie de plusieurs études.

Tableau 1 : Récapitulatif des références pour l'analyse pétiolaire issues de plusieurs études. Sont repris l'auteur et la date de la référence, les seuils pour l'interprétation ainsi que le cépage sur lequel a été réalisé les mesures et le lieu d'où les mesures proviennent.

Élément	Auteur/année	Seuil bas	Seuil haut	Cépage	Lieu
Azote	Delas, 2010	4	6	bordelais	bordelais
	Dami, 2005	9	13		Ohio
	Benito et al., 2013	6	7	Garnacha	Nord Espagne
	Dominguez et al., 2015	4	8	Graciano	Nord Espagne
Phosphore	Delas, 2010	1	1.8	bordelais	bordelais
	Dami, 2005	1.6	2.9		Ohio
	Benito et al., 2013	2.5	3	Garnacha	Nord Espagne
	Dominguez et al., 2015	0.5	1.2	Graciano	Nord Espagne
Calcium	Delas, 2010	20	40	bordelais	bordelais
	Dami, 2005	12	18		Ohio
	Benito et al., 2013	23	26	Garnacha	Nord Espagne
	Dominguez et al., 2015	25	28	Graciano	Nord Espagne
Potassium	Delas, 2010	15	25	bordelais	bordelais
	Dami, 2005	15	25		Ohio
	Benito et al., 2013	16	20	Garnacha	Nord Espagne
	Dominguez et al., 2015	10	12	Graciano	Nord Espagne
Magnésium	Delas, 2010	4	6	bordelais	bordelais
	Dami, 2005	2.6	4.5		Ohio
	Benito et al., 2013	10	17	Garnacha	Nord Espagne
	Dominguez et al., 2015	10	12	Graciano	Nord Espagne

### Annexe 2 : Stations météorologiques.

Tableau 1 : Stations météorologiques retenues pour les données climatiques de 2014 à 2019 des parcelles d'étude.

Parcelle	Station météorologique
brie	Pellegrue-Vignolles
coutu	Sainte-Gemme
gard	Belves de Castillon Euralis
labr	Saint-Médard-d'Eyrans
levsa	Coubeyrac
list	Listrac
ltb	Sauternes
mont	Montagne
nauj	Saint-Aubin-de-Branne
sel	Belves de Castillon Euralis
stem	Saint-Emilion-Semard
stml	Saint-Trojan

### Annexe 3 : Sélection des variables pour caractériser les baies.

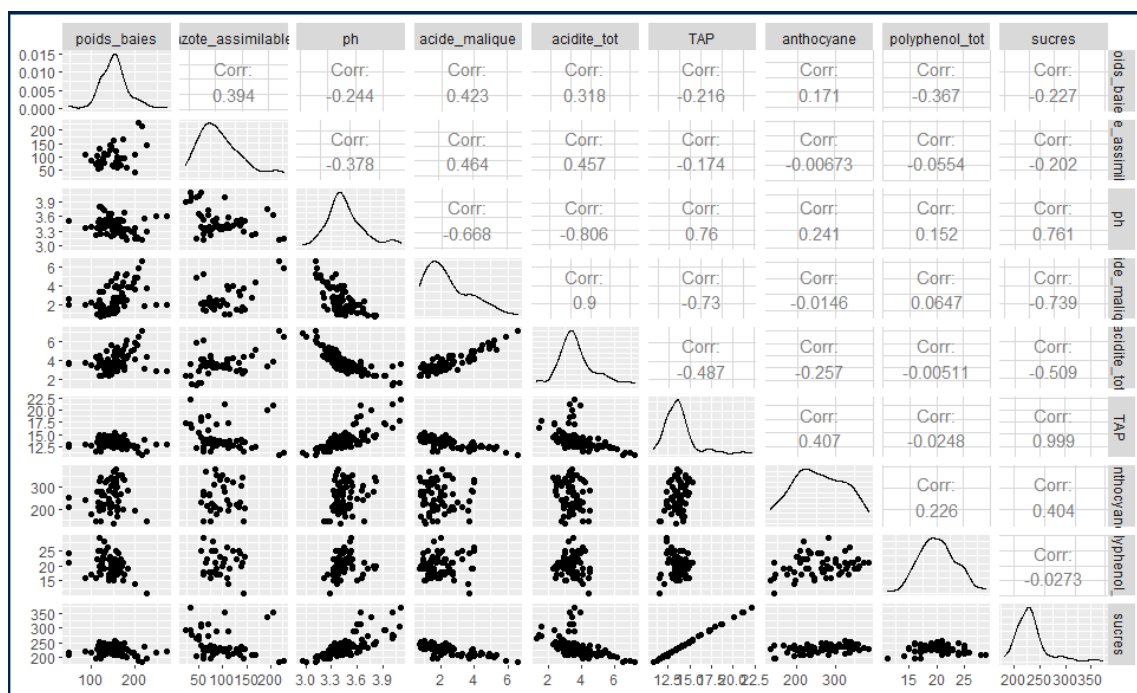


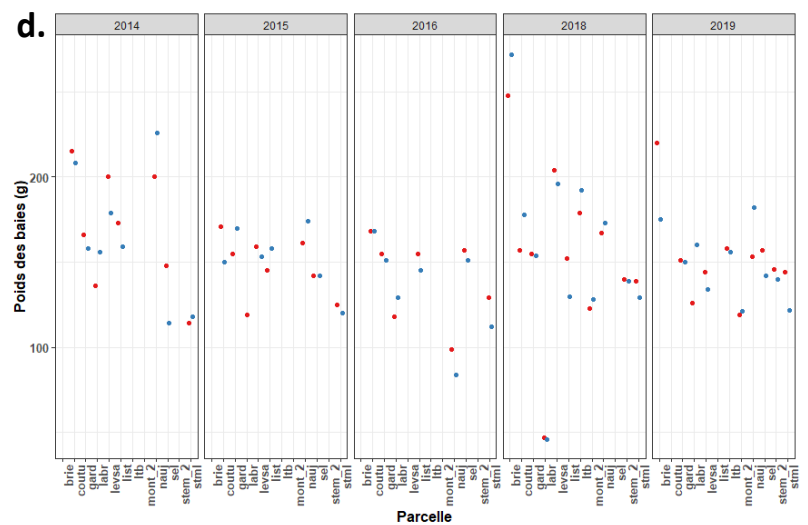
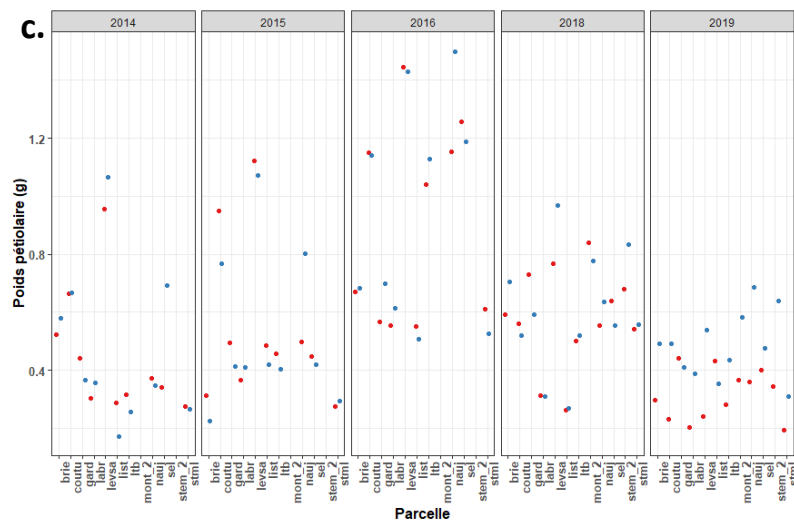
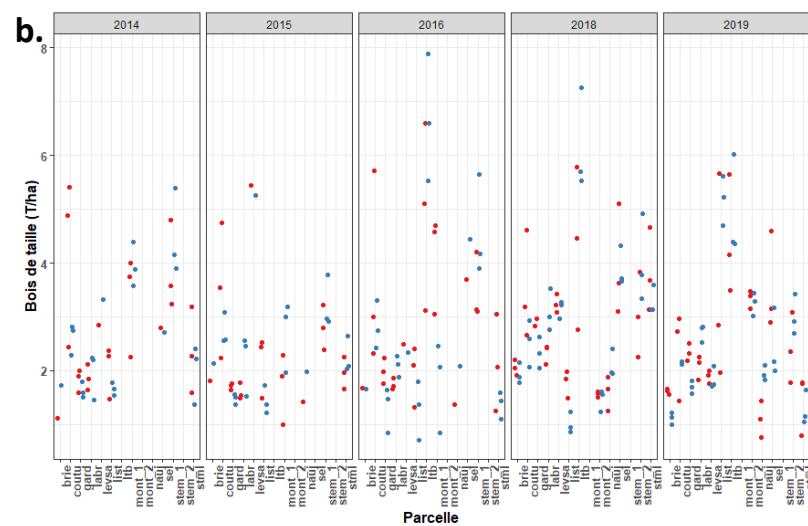
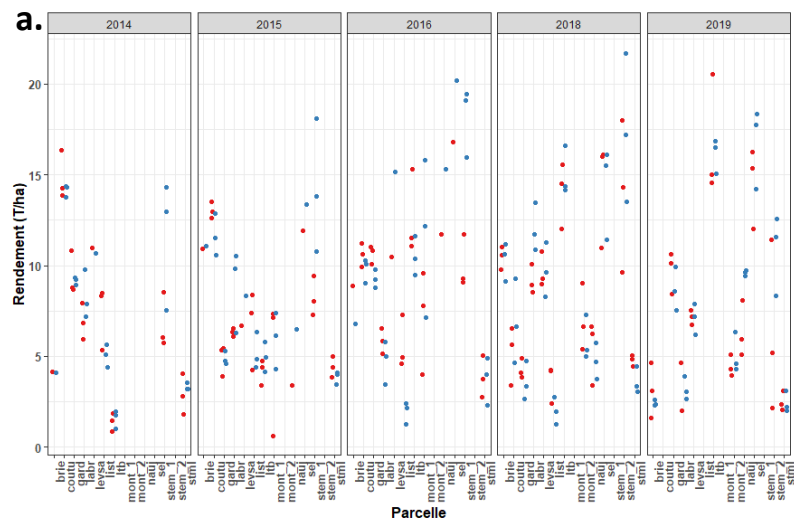
Figure 1 : Corrélations de Pearson calculées pour chaque variable mesurée pouvant décrire la performance caractéristique des baies. Pour une valeur de  $|0.5|$ , la corrélation est importante (Cohen, 1988), les variables ne seront pas conservées pour une valeur de corrélation égale ou supérieure. Les variables sélectionnées sont le poids de baies, l'azote assimilable et la concentration en anthocyanes, en polyphénols totaux et en sucres.

#### Annexe 4 : Paramétrisation de WaLIS pour la simulation de la FTSW de la vigne sur les parcelles list et labr.

Tableau 1 : Paramétrisation du modèle WaLIS pour les parcelles list et labr pour les deux traitements mis en place. Les dates sans année précisée sont considérées être les mêmes pour chaque année entre 2014 et 2019.

Paramètre	ltb		labr	
	T	PA	T	PA
$p_{max}$	0.33	0.66	0.33	0.66
$p_{min}$	0	0	0	0
$p_{ini}$	0	0	0	0
TTSW <sub>tot</sub>	112	112	162	162
TTSW <sub>hmin</sub>	0.001	0.001	0.001	0.001
TTSW <sub>hmax</sub>	12.75	12.75	27	27
TTSW <sub>hini</sub>	0.001	0.001	0.001	0.001
ASW <sub>hinit</sub>	12.75	12.75	27	27
ASW <sub>vinit</sub>	112	112	162	162
$d_{tonte}$	22/06	26/04, 22/05 et 22/06	23/05, 22/06 et 05/08	24/04, 23/05, 22/06 et 05/08
$d_{labourIR}$	18/05 et 22/05	10/09 et 20/09	-	20/09
$d_{labourR}$	18/05	18/05	25/04, 04/05, 22/06, 22/07 et 24/08	25/04, 04/05, 22/06, 22/07 et 24/08
Valeur commune aux parcelles et aux traitements				
Paramètre	Valeur		Paramètre	Valeur
$j_{deb}$	01/01/2014		inn	0.3
$j_{fin}$	31/12/2019		herblairate	0.65
$seuil_{peff}$	2		LAI <sub>init</sub>	0
U	2.7		LAI <sub>res</sub>	0.3
$b_{1\_evap}$	14		LLS <sub>min</sub>	540
$b_{2\_evap}$	0.15		T <sub>base</sub>	10
FTSW <sub>hregultr</sub>	0.5		dbr	03/04
FTSW <sub>hregulLAI</sub>	0.7		arretTr	01/11
flagRuiss	N		ddk <sub>max</sub>	400
flagIrri	N		k <sub>max</sub>	0.5
reinit	N		FTSW <sub>vregulTR</sub>	0.4
levee	01/10			

## Annexe 5 : Performances viticoles en fonction du traitement, de l'année et de la parcelle.



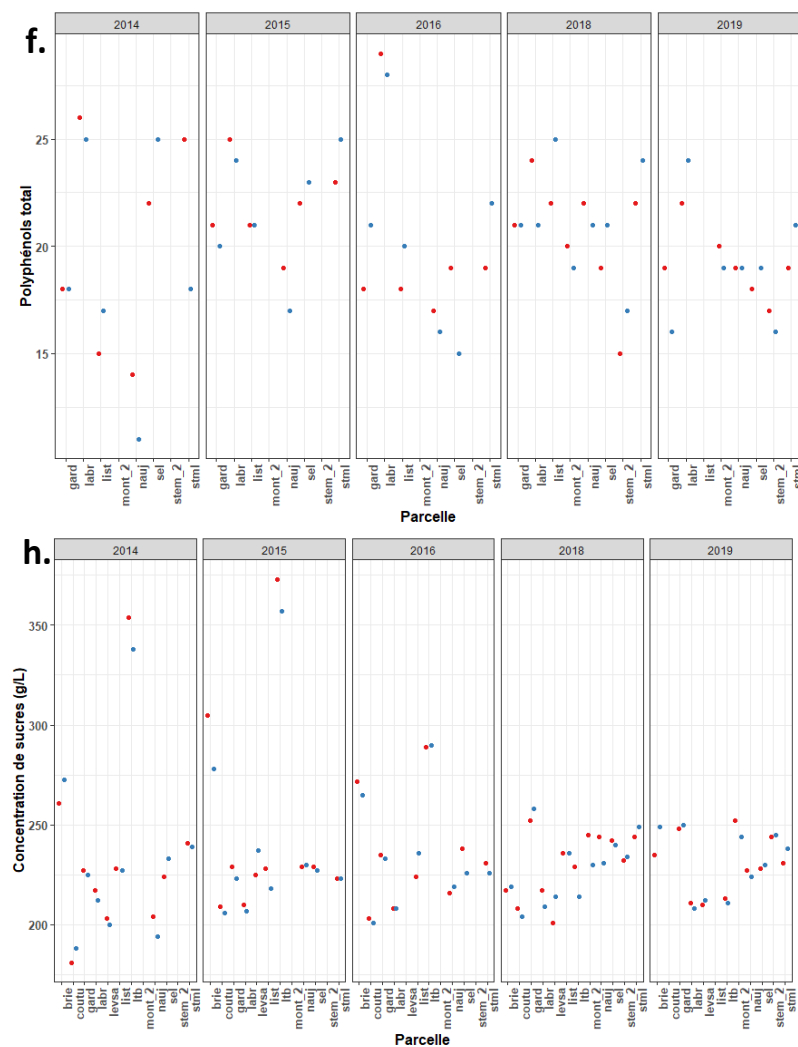
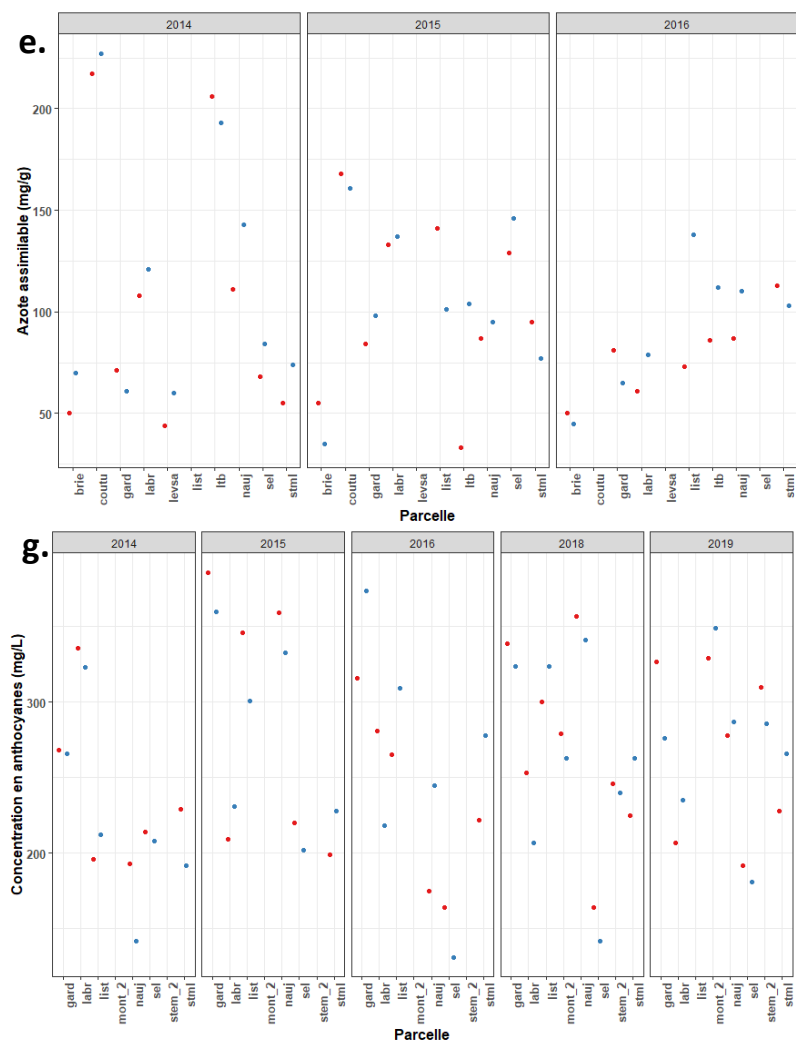


Figure 1 : Performances viticoles par traitement, année et parcelle d'étude. Les performances sont le rendement (a), le poids de bois de taille (b), le poids pétiolaire (c), le poids des baies (d), l'azote assimilable (e) et les concentrations en polyphénols totaux (f), en anthocyanes (g) et en sucres (h). Les points rouges correspondent aux PA et les bleus aux Témoins.

## Annexe 6 : $\Delta_{performances}$ en fonction du traitement, de l'année et de la parcelle.

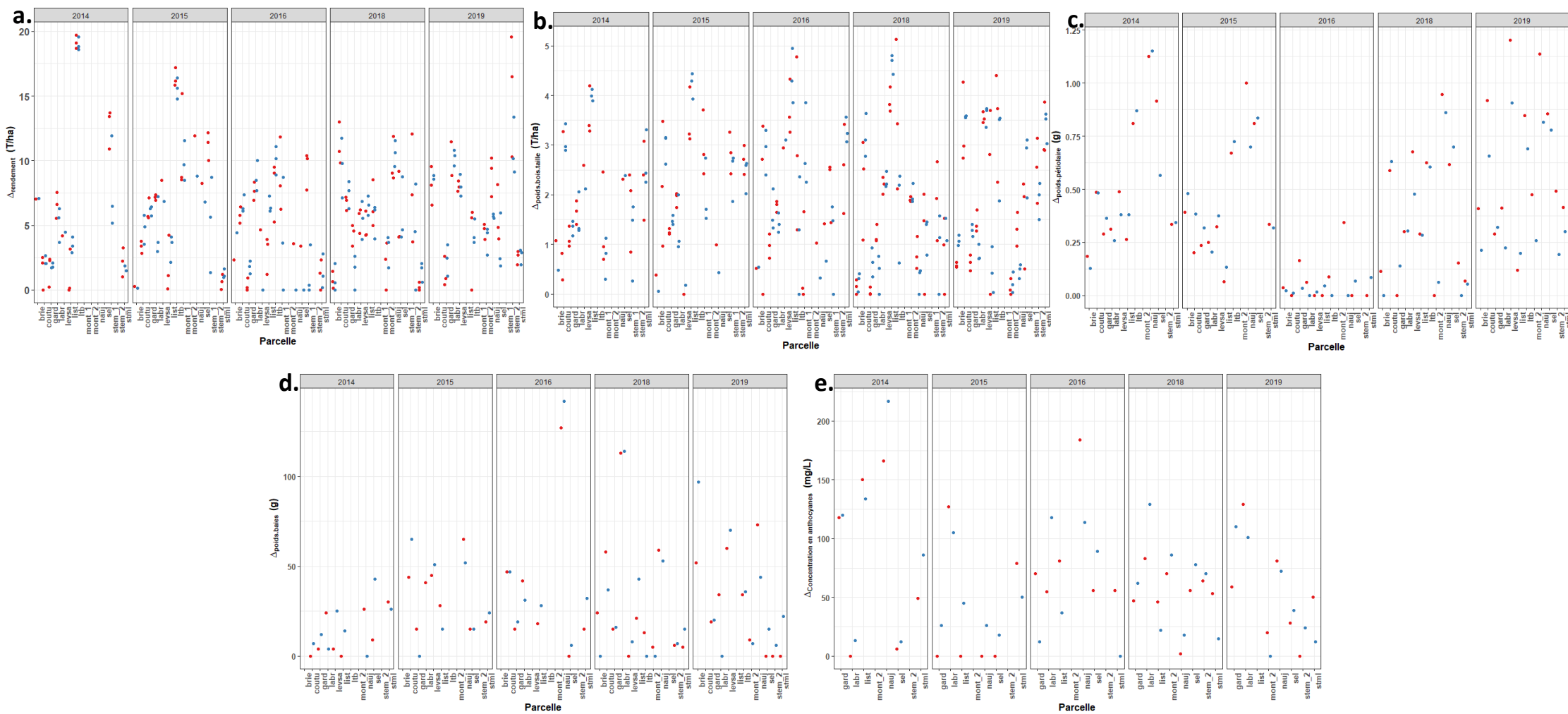


Figure 1 :  $\Delta_{performances}$  par traitement, année et parcelle d'étude. Les  $\Delta_{performances}$  sont le  $\Delta_{rendement}$  (a), le  $\Delta_{poids.bois.taill}$  (b), le  $\Delta_{poids.pétiole}$  (c), le  $\Delta_{poids.baies}$  (d) et  $\Delta_{anthocyanes}$  (e). Les points rouges correspondent aux PA et les bleus aux Témoins.

## Annexe 7 : Résultats des p-values des modèles linéaires sélectionnés explicatifs de chaque performance viticole.

Tableau 1 : Récapitulatif des p-values des modèles linéaires sélectionnés explicatifs de chaque performance viticole utilisés pour l'analyse de la dominance. La p-value accompagnée d'étoile (\*) indique la significativité du résultat (pas d'étoile signifie p-value > 0.05, «\*» signifie p-value < 0.05, «\*\*» signifie p-value < 0.01, «\*\*\*» signifie p-value < 0.001). Les variances des performances entre les PA et les Témoins sont significativement différentes si p-value < 0.05. «-» signifie que la variable n'intervient pas dans le modèle sélectionné pour la performance correspondante.

Variables	Traitement	Année	Parcelle	Traitement:Parcelle	Année:Parcelle	Traitement:Année
$\Delta_{rendement}$	0.0019 **	4.35 <sup>E-09</sup> ***	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	1.09 <sup>E-12</sup> ***	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	-
$\Delta_{poids.bois.taille}$	0.8742	8.05 <sup>E-05</sup> ***	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	3.66 <sup>E-06</sup> ***	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	-
$\Delta_{poids.pétiole}$	0.0045 **	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	0.0085 **	1.47 <sup>E-10</sup>	0.00055 ***
$\Delta_{poids.baies}$	-	6.00 <sup>E-06</sup> ***	3.09 <sup>E-13</sup> ***	-	2.43 <sup>E-11</sup>	-
<b>Azote assimilable</b>	-	9.34 <sup>E-07</sup> ***	1.97 <sup>E-10</sup> ***	-	5.53 <sup>E-06</sup> ***	-
<b>Concentration en polyphénols</b>	-	0.00023 ***	1.20 <sup>E-10</sup> ***	-	6.63 <sup>E-05</sup> ***	-
$\Delta_{anthocyanes}$	-	0.00025 ***	0.00024 ***	-	3.72 <sup>E-08</sup> ***	-
<b>Concentration en sucres</b>	-	3.02 <sup>E-12</sup> ***	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	-	<2.2 <sup>E-16</sup> ***	-

## Annexe 8 : R<sup>2</sup> totaux des modèles linéaires sélectionnés pour l'explication des variations de $\Delta_{performances}$ et des valeurs brutes.

Tableau 1 : Récapitulatif des R<sup>2</sup> des modèles linéaires sélectionnés explicatifs de chaque performance viticole utilisés pour l'analyse de la dominance.

Variables	R <sup>2</sup>
$\Delta_{rendement}$	0.884
$\Delta_{poids.bois.taille}$	0.773
$\Delta_{poids.pétiole}$	0.980
$\Delta_{poids.baies}$	0.924
<b>Azote assimilable</b>	0.927
<b>Concentration en polyphénols</b>	0.889
$\Delta_{anthocyanes}$	0.879
<b>Concentration en sucres</b>	0.987



## Annexe 9 : Typologie de parcelles basée sur des milieux pédoclimatiques homogènes.

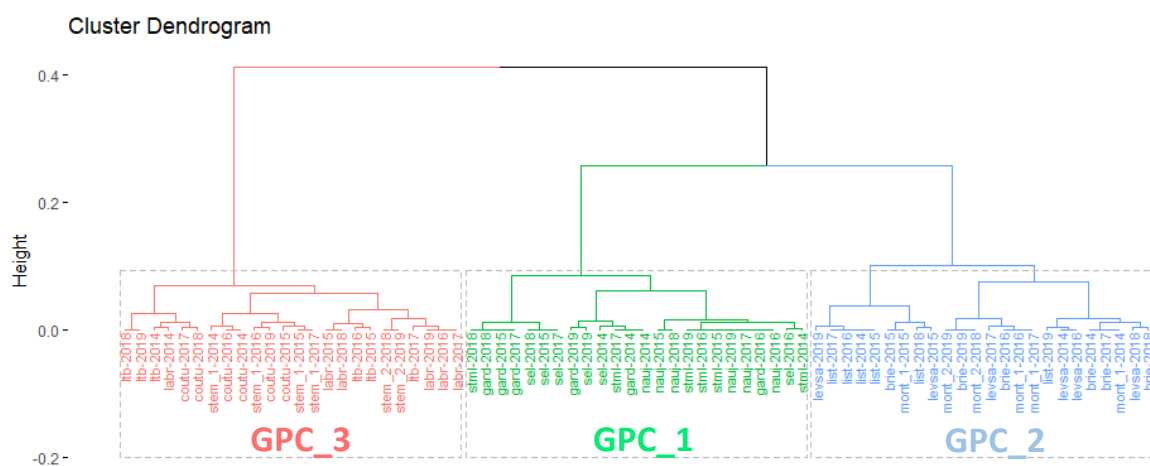
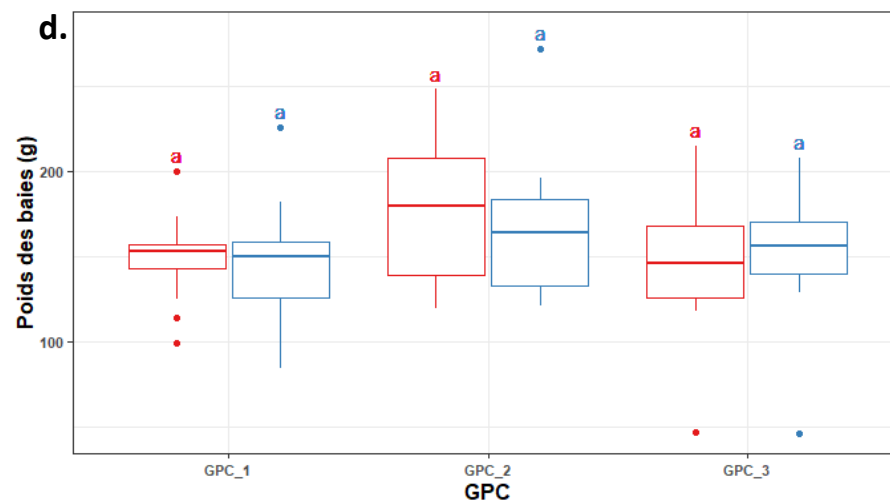
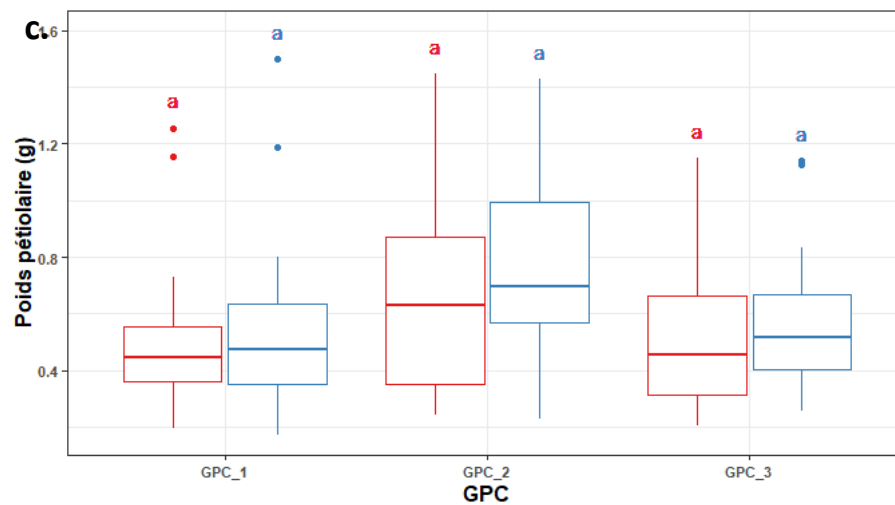
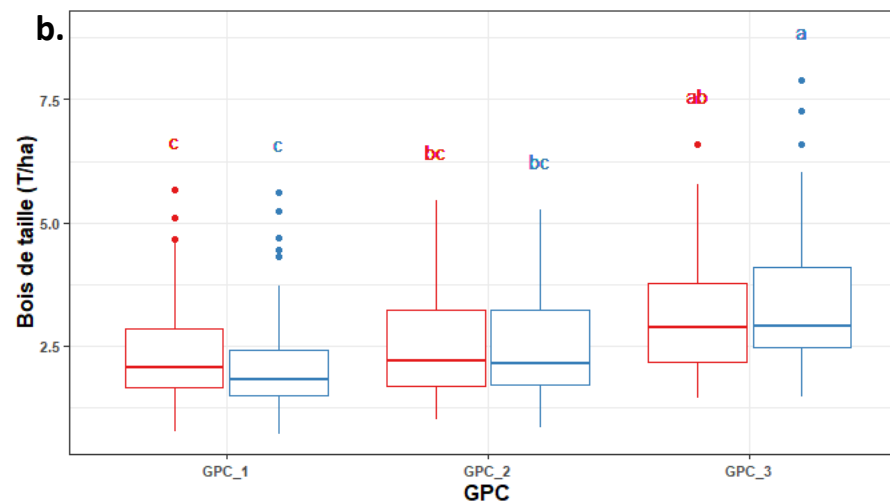
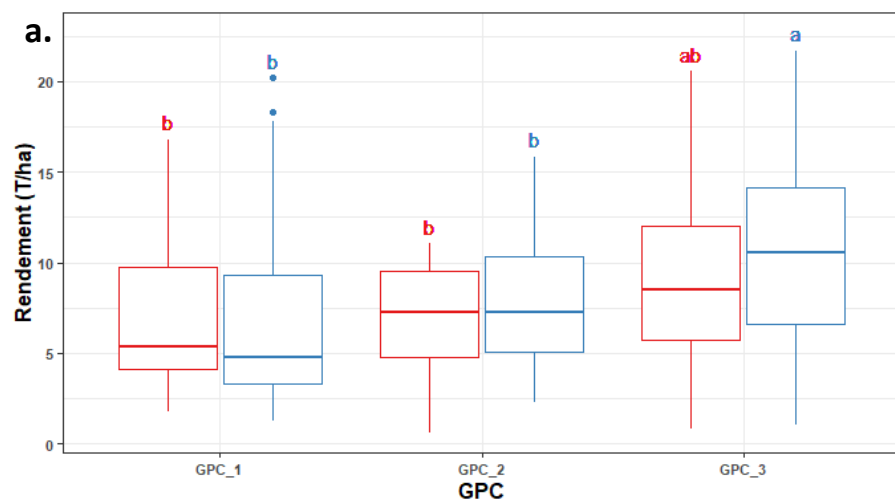


Figure 1 : Dendrogramme de la CAH sur les caractéristiques pédoclimatiques des parcelles d'étude.

## Annexe 10 : Performances viticoles par GPC et traitements.



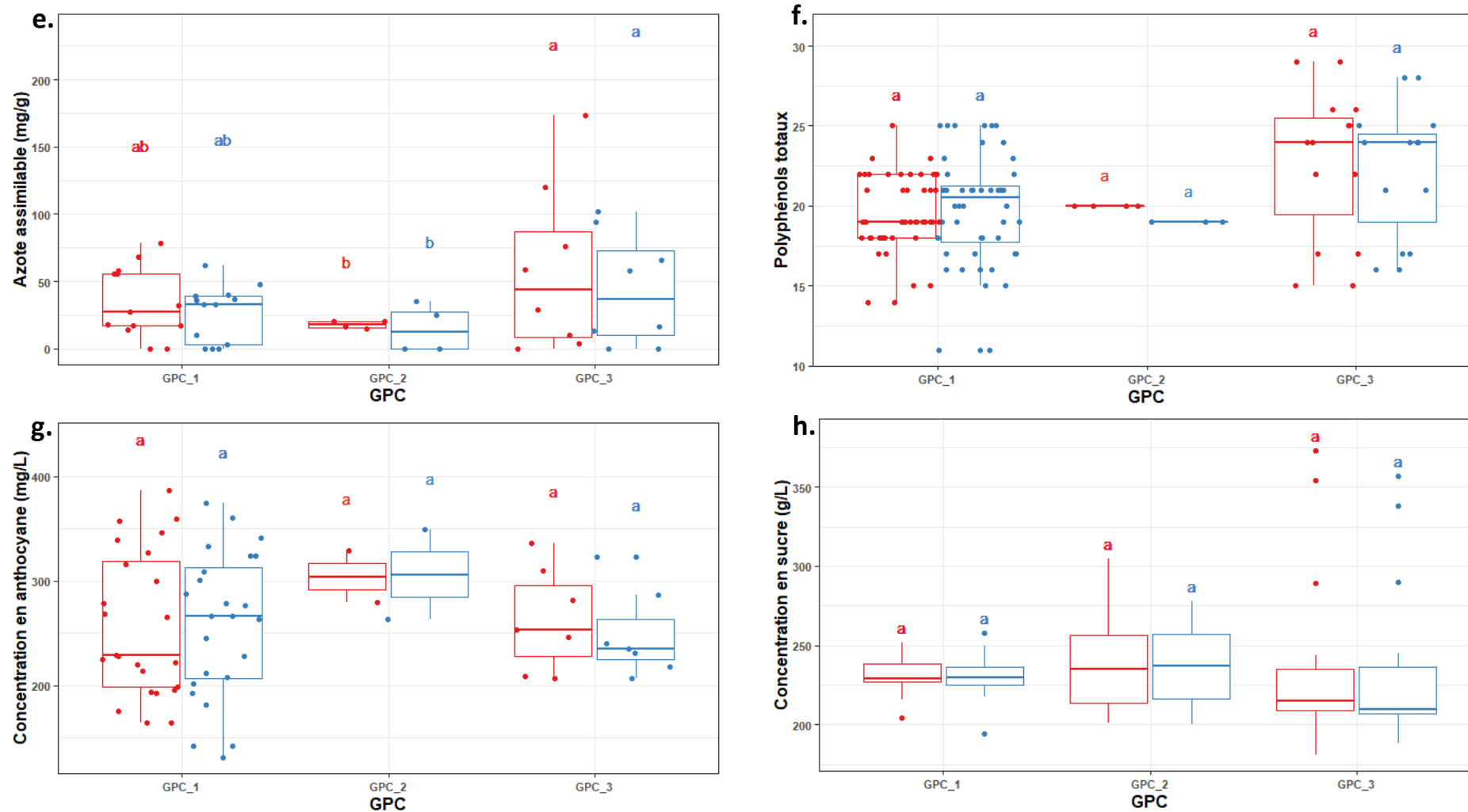


Figure 1 : Performances viticoles par traitement en fonction des GPC. Les performances sont le rendement (a), le poids de bois de taille (b), le poids pétiolaire (c), le poids des baies (d), l'azote assimilable (e) et les concentrations en polyphénols totaux (f), en anthocyanes (g) et en sucres (h). Les données en rouges correspondent aux PA et les bleues aux Témoins. Les différences entre moyenne qui partagent une lettre ne sont pas significatives (test de Tukey).

## Annexe 11 : Typologie de parcelles basée sur des mises en œuvre de pratiques homogènes.

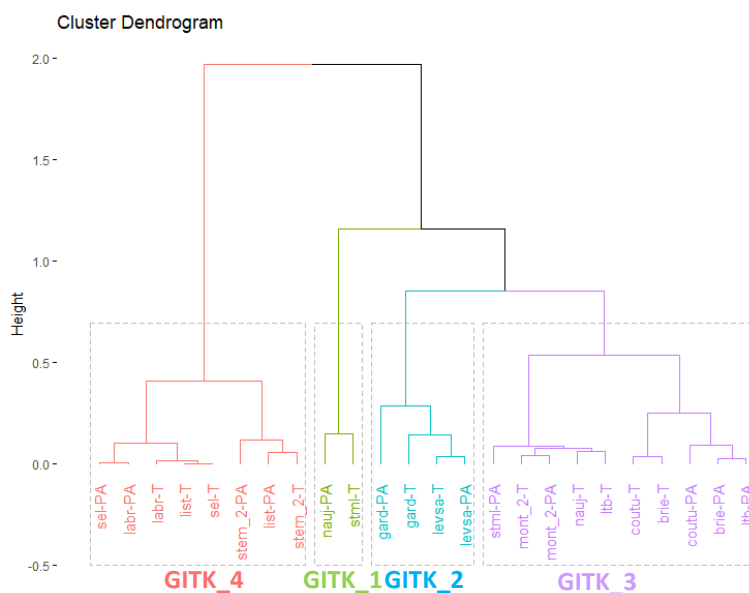
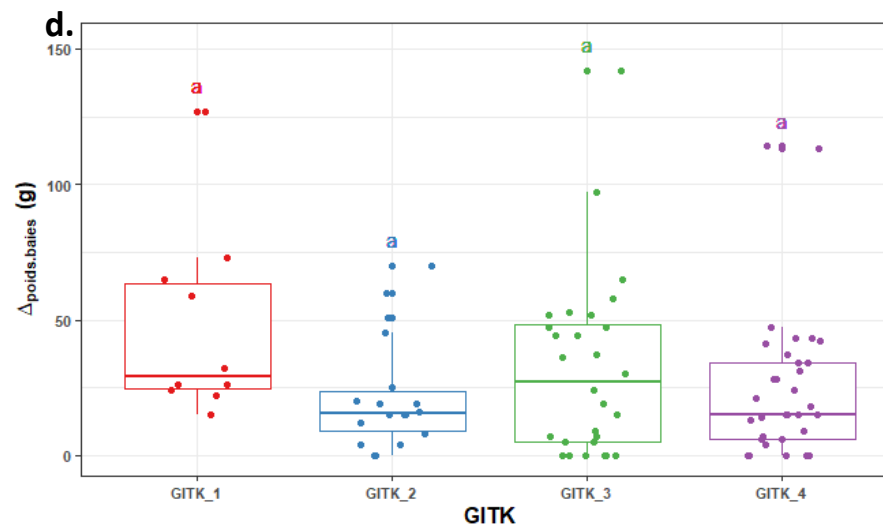
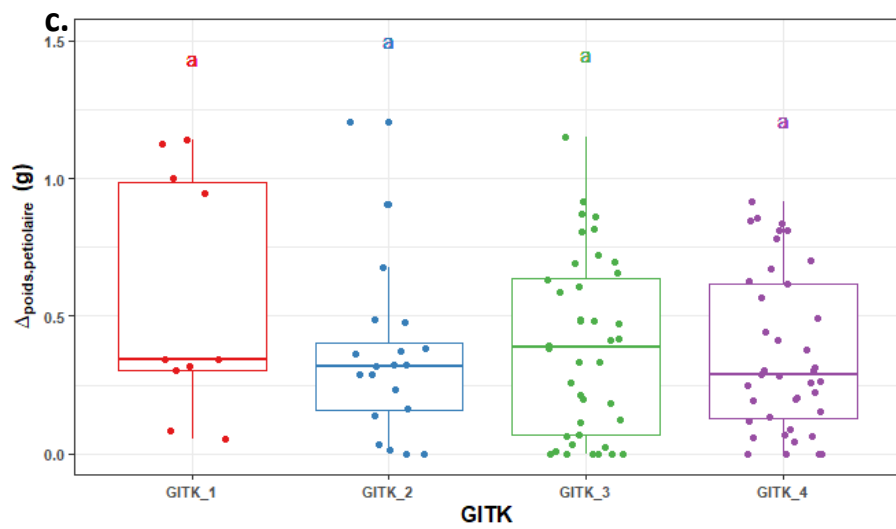
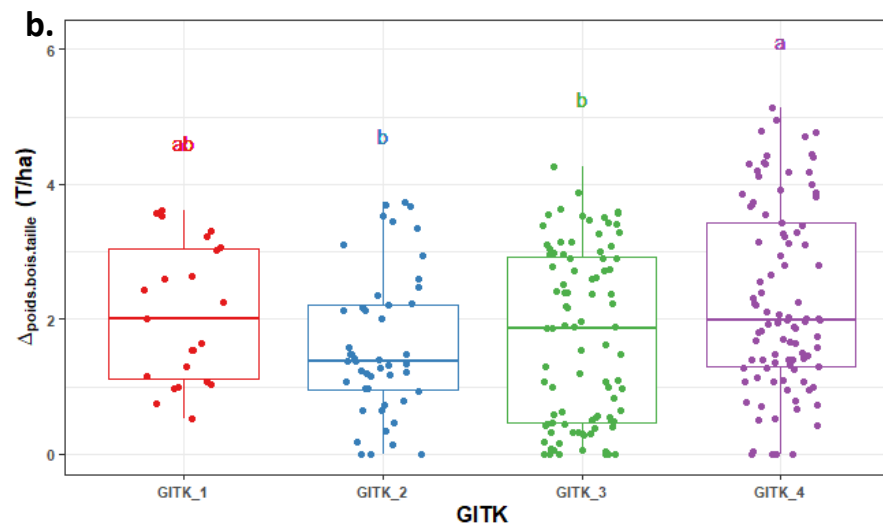
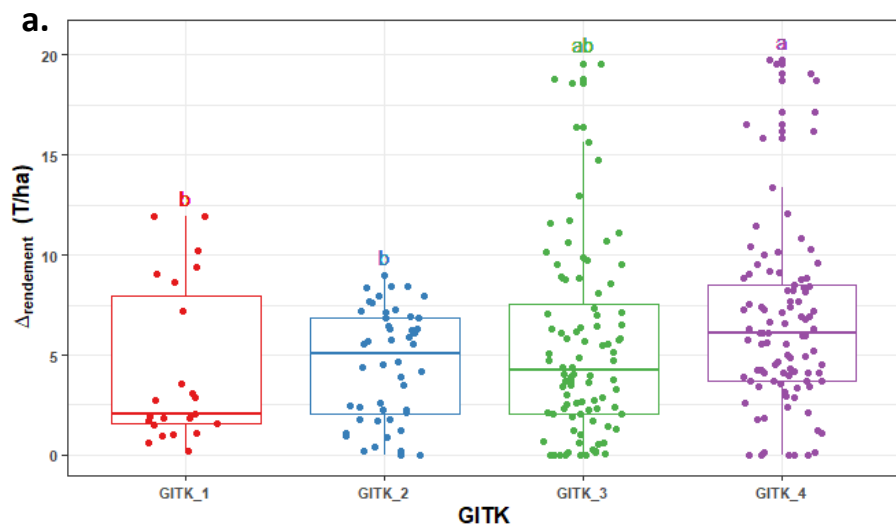


Figure 1 : Dendrogramme de la CAH sur les interventions culturelles pratiquées sur les parcelles d'étude.

## Annexe 12 : Performances viticoles par GITK.



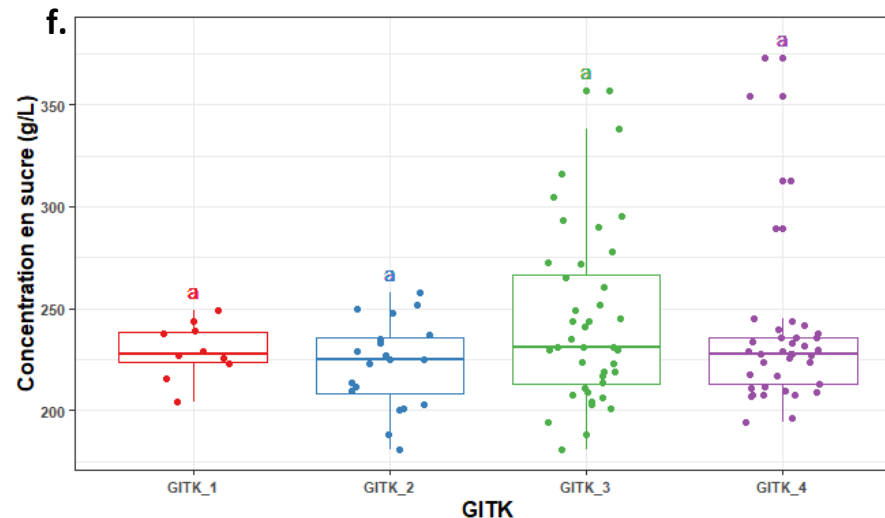
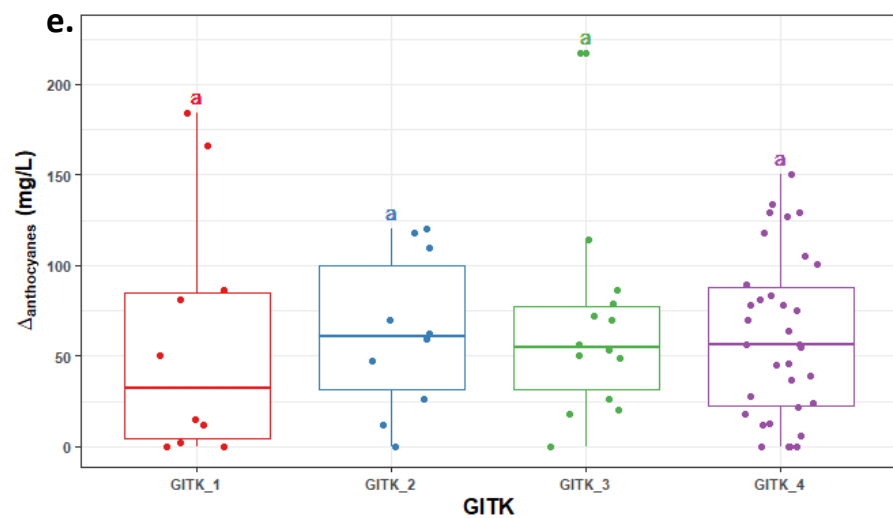
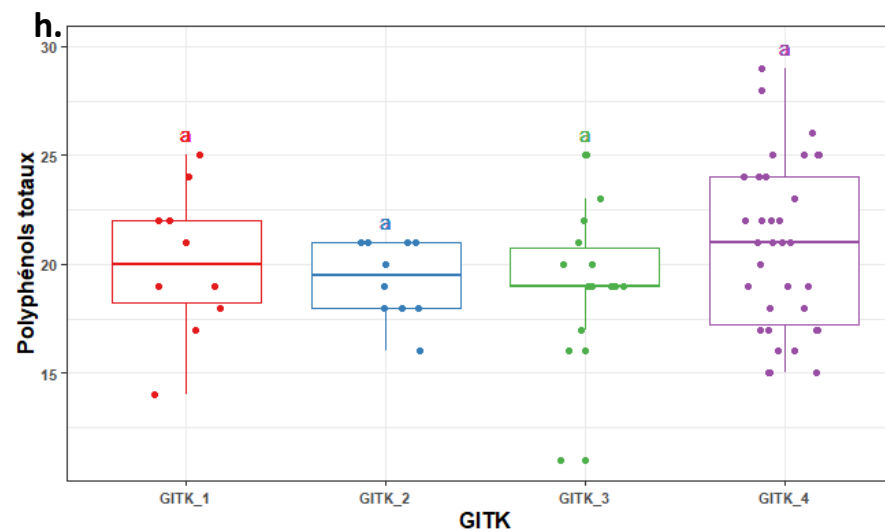
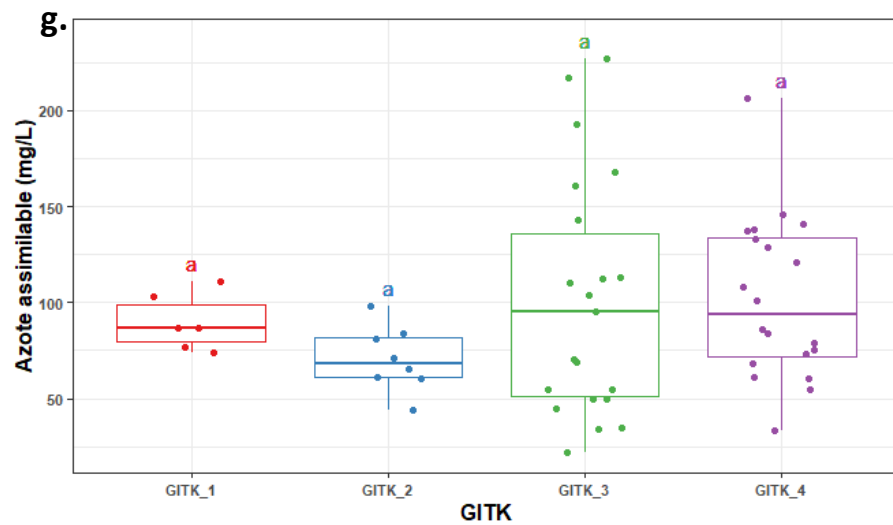


Figure 1 : Performances viticoles par traitement en fonction des GITK. Les performances sont le  $\Delta_{\text{rendement}}$  (a), le  $\Delta_{\text{poids.bois.taille}}$  (b), le  $\Delta_{\text{poids.pétiolaire}}$  (c), le  $\Delta_{\text{poids.baies}}$  (d), l'azote assimilable (e) et les concentrations en polyphénols totaux (f), en  $\Delta_{\text{anthocyanes}}$  (g) et en sucres (h). Les différences entre moyenne qui partagent une lettre ne sont pas significatives (test de Tukey).

### Annexe 13 : Caractérisation climatique mensuelle des parcelles sur les années d'étude.

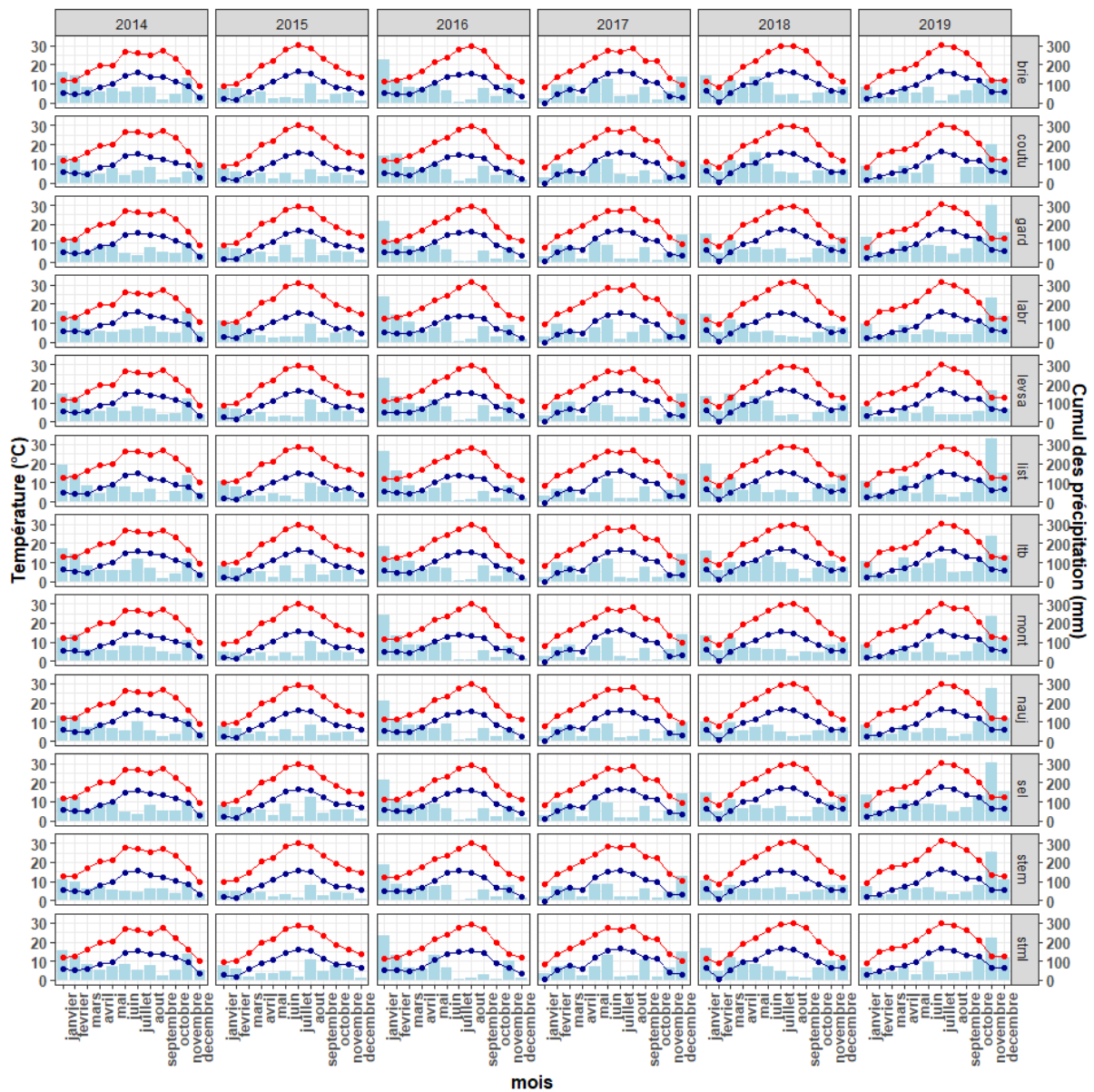


Figure 1 : Caractérisation climatique mensuelle des parcelles sur l'ensemble des années d'étude. La courbe rouge correspond à la température maximale, la courbe bleue correspond à la température minimale.

## Annexe 14 : Modélisation de la FSTW de la vigne par WaLIS pour les parcelles list et labr entre 2014 et 2019.

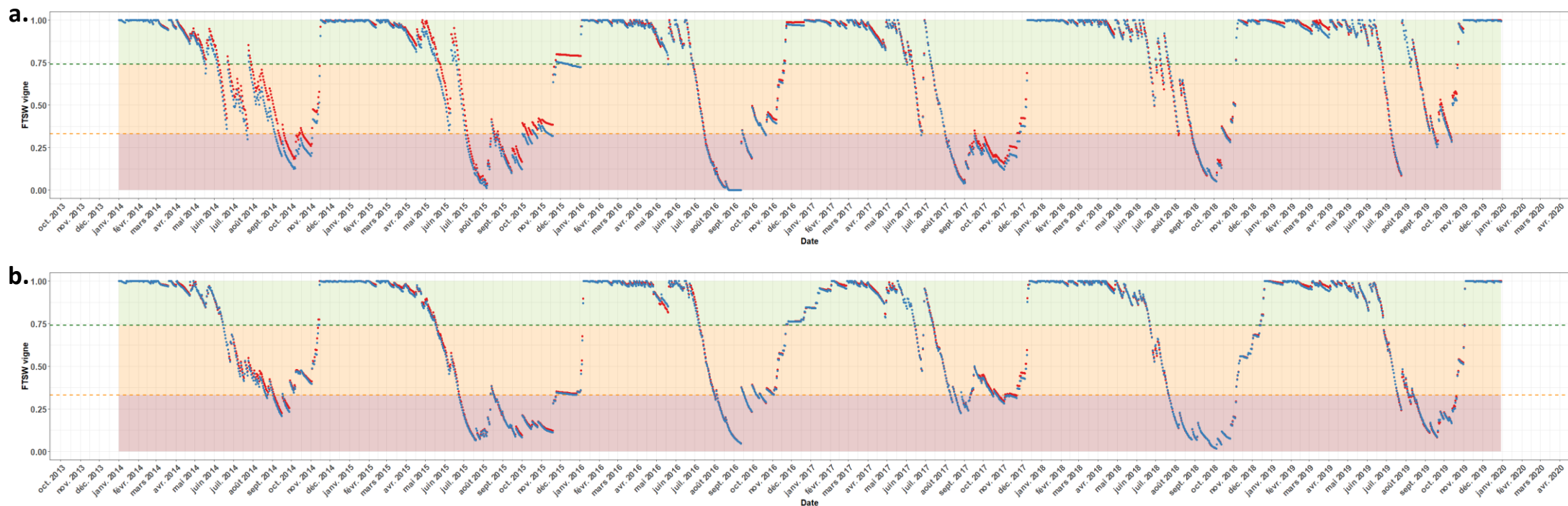


Figure 1 : Modélisation de la FTSW de la vigne par WaLIS pour les parcelles list (a) et labr (b) entre 2014 et 2019 pour les traitements PA (courbe rouge) et Témoin (courbe bleue). Les seuils correspondent aux seuils de stress hydrique issus de Pellegrino et al. (2006), en vert : situation de bonne hydratation de la vigne, en orange : situation de stress modéré pour la vigne, en rouge : situation de stress intense pour la vigne.



# Abstract

**Title : Multi-year assessment of the effect of sustainable soil management practices on viticultural performances in the Bordeaux vineyards.**

The VERTIGO project aims to promote the sustainable soil management implementation in Bordeaux vineyards. This work, in connection with this project, aims to assess the effect of sustainable soil management practices implementation (service cover sown in the inter-row, organic amendment, extensive mowing) on viticultural performances, through 8 variables : yield, pruning weight, petiolar weight, berry weight, assimilable nitrogen and concentrations of polyphenols, anthocyanin and sugar. The sustainable practice effects are studied over 5 years in comparison with the usual practices of winegrowers on 14 plots. Alternative practice implementation has no significant effect on viticultural performances. Yields are nevertheless more stable with alternative practice implementation. The pedoclimatic factors, which vary greatly throughout the Bordeaux vineyard, are the main factors explaining the yield, vigor and berry characteristics (84%, 71% and 75% respectively). However, the alternative practices implementation has no effect on viticultural performances when these performances are evaluated within plots with homogeneous pedoclimatic characteristics. Finally, as the cultural operations implemented for the alternative practices and the winegrower's usual practices differed from one plot to another, we completed the analysis by grouping plot with similar technical itineraries. Performance analysis within these groups showed that heavy mechanical weeding implementation (3 to 4 times per year) on rows and inter-rows with a high planting density can increase the losing yield and vigor risk. Service crop establishment provides many ecosystem services, the main ones being coverage and mineral restitution. Working hours are on average 20% higher than usual practices, which may be feasible for plots with low working time. These results are in favor of alternative practices technical adoption by Bordeaux winegrowers to choose a more sustainable vineyard management. For the project remainder, a greater replication number with measurements by foot, particularly for yield and pruning weights, would allow more robust results to be obtained regarding the effect of these alternative practices on the viticultural performances.

**Key words :**

practices sustainability, viticulture, service crops, system assessment, agroecology

# Résumé

**Titre : Evaluation pluriannuelle de l'effet de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais.**

Le projet VERTIGO a pour but de promouvoir la mise en place de gestion durable du sol au sein des vignobles bordelais. Ce mémoire de fin d'étude, réalisé dans le cadre de ce projet, a pour but d'évaluer l'effet de la mise en place de pratiques de gestion durable du sol (cultures de service semées dans l'inter-rang, amendement organique, tonte extensive) sur les performances viticoles, à travers 8 variables : le rendement, le poids de bois de taille, le poids pétiolaire, les poids des baies, l'azote assimilable et les concentrations en polyphénols, en anthocyane et en sucre. Les effets de ces pratiques durables sont étudiés sur 5 ans en comparaison avec les pratiques habituelles des viticulteurs sur 14 parcelles. La mise en place des pratiques alternatives n'a pas d'effet significatif sur les performances viticoles. Les rendements sont néanmoins plus stables avec la mise en place des pratiques alternatives. Les facteurs pédoclimatiques, très variables à l'échelle du vignoble bordelais, sont les principaux facteurs explicatifs du rendement, de la vigueur et des caractéristiques des baies (respectivement 84%, 71% et 75%). Toutefois, la mise en place de pratiques alternatives n'a pas d'effet sur les performances viticoles lorsqu'on évalue ces performances au sein de parcelles aux caractéristiques pédoclimatiques homogènes. Enfin, les opérations culturales mises en œuvre pour les pratiques alternatives et pour les pratiques habituelles des viticulteurs étant différentes d'une parcelle à l'autre, nous avons complété l'analyse en regroupant les parcelles aux itinéraires techniques similaires. L'analyse des performances au sein de ces groupes a montré que la mise en place de désherbages mécaniques à fréquence élevée (3 à 4 fois par an) sur le rang et l'inter-rang avec une forte densité de plantation peut augmenter le risque de perdre du rendement et de la vigueur. La mise en place de cultures de services permet d'obtenir de nombreux services écosystémiques dont les principaux sont la couverture du sol et la restitution de minéraux. Le temps de travail est en moyenne 20% plus élevé que le recours aux pratiques habituelles, ce qui peut être envisageable pour les parcelles où le temps de travail est faible. Ces résultats sont en faveur de l'adoption sur un plan technique de ces pratiques alternatives par les viticulteurs bordelais pour choisir une gestion plus durable des vignobles. Pour la suite du projet, un plus grand nombre de répétitions avec des mesures au pieds, notamment pour le rendement et les poids de bois de taille, permettrait d'obtenir des résultats plus robustes concernant l'effet de ces pratiques alternatives sur les performances viticoles.

**Mots clefs :**

durabilité des pratiques, viticulture, cultures de services, évaluation de système, agroécologie

Pour citer cet ouvrage : Pasquel, Daniel, 2020. Evaluation pluriannuelle de l'effet de la mise place de pratiques de gestion durable du sol sur les performances viticoles dans le vignoble bordelais. Mémoire d'Ingénieur Agronome, option Production Végétale Durable, L'institut Agro - Montpellier SupAgro. 73 pages.