



HAL
open science

Étude sur la restauration et le maintien de la vigueur de la vigne sous différentes stratégies de fertilisation et d'entretien du sol

Jérémy Moulin

► **To cite this version:**

Jérémy Moulin. Étude sur la restauration et le maintien de la vigueur de la vigne sous différentes stratégies de fertilisation et d'entretien du sol. *Agronomie*. 2019. dumas-02972676

HAL Id: dumas-02972676

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02972676>

Submitted on 26 Oct 2020

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.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME
option : Viticulture Œnologie
parcours : Vigne et Vin

**Etude sur la restauration et le maintien de la vigueur
de la vigne sous différentes stratégies de fertilisation
et d'entretien du sol**

Par **Jérémy MOULIN**

Année de soutenance : 2019

Organisme d'accueil : Comité Champagne



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du
DIPLÔME D'INGÉNIEUR AGRONOME
option : Viticulture Œnologie
parcours : Vigne et Vin

**Etude sur la restauration et le maintien de la vigueur
de la vigne sous différentes stratégies de fertilisation
et d'entretien du sol**

par

Jérémy MOULIN

Mémoire préparé sous la direction de :
Aurélie Metay

Organisme d'accueil :
Comité Champagne

Présenté le : 06/11/2019

Maître de stage : Constance
Demestihas



Résumé :

Dans un contexte d'évolution des pratiques vers des pratiques plus durables, de nombreux Vignerons et Maisons de Champagne ont abandonné les herbicides et modifié leurs pratiques de fertilisation et d'entretien du sol. Cependant, ces nouveaux itinéraires culturaux ont vu l'apparition de différentes difficultés écophysiologicals comme la diminution de la vigueur ou des rendements. L'objectif de cette étude est de comprendre quelles stratégies de fertilisation et de travail du sol permettent de restaurer ou d'augmenter la vigueur de la vigne. Pour répondre à cet objectif, un ensemble d'indicateurs écophysiologicals et pédoclimatiques ont été choisis et suivis sur un réseau de six parcelles dispersées à travers la Champagne représentant les trois cépages principaux de l'AOC. Deux années de données écophysiologicals ont été croisées aux données pédoclimatiques ainsi qu'aux itinéraires culturaux afin de comprendre quelles stratégies sont les plus efficaces pour maintenir la vigueur. Cette étude s'est réalisée à deux échelles, la première interparcellaire pour comprendre de façon globale quelles pratiques sont les plus efficaces. La seconde à l'échelle parcellaire pour déterminer quelles pratiques sont les plus pertinentes en fonction des données pédoclimatiques des parcelles.

Mots-clés : Vigueur, Fertilisation, Entretien du sol, Indicateur, Ecophysiological, Pédoclimat, Itinéraire technique

Remerciements

Mes remerciements vont avant tout à Constance Demestihias, ma maîtresse de stage durant ces six mois au sein du service vigne du Comité Champagne, pour sa disponibilité, sa réactivité et ses précieux conseils. Je la remercie pour tous ces moments passés avec moi sur les parcelles et en fait simplement pour son rôle de maîtresse de stage qu'elle a parfaitement rempli.

Je remercie également très sincèrement Arnaud Descôtes, directeur du service technique et environnement et Sébastien Debuissou, responsable du service vigne du Comité Champagne, pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe vigne du Comité et de m'avoir permis de travailler dans d'aussi bonnes conditions.

Un grand merci à Camille Dumortier, stagiaire avant moi et maintenant salariée au Comité Champagne, qui m'a permis de m'intégrer rapidement dans mon stage et qui n'a jamais hésité à venir m'aider lorsque j'en avais besoin.

Merci aux chefs de projet, Mathieu Liébart, Julie Perry, Pascale Pienne, Marie-Laure Panon, Maxime André, Pierre Naviaux, Géraldine Uriel, Basile Pauthier, Alexandra Bonomelli, Bruno Duron et à l'ensemble des assistants chef de projet, pour le temps qu'ils m'ont accordé pour mes nombreuses questions et pour leurs avis et connaissances pointues sur la gestion du vignoble.

Un grand merci également à l'ensemble des personnes présentes dans l'openspace : Alexandra, Elyesse, Léa, Nadia et Sandra, pour leur bonne humeur qui ont rendu mes heures de travail encore plus agréables.

Merci à l'ensemble du personnel du domaine expérimental de Plumecoq qui aura toujours pris le temps de répondre à mes questions lors de mes passages sur le domaine.

Merci également à l'ensemble des personnes du Comité Champagne aussi bien au service vin, que ressources humaines ou communication pour leur bienveillance et leur sympathie qui m'auront accompagné tout au long de ce stage.

Pour finir, je tenais à remercier sincèrement Mme Metay, ma tutrice de stage qui m'a accompagné tout au long de ces six mois, pour sa très grande réactivité, ses réponses à mes questions, ainsi que ses références et conseils toujours avisés tout au long de ce stage.

Table des matières

Introduction	19
Partie 1 : Contexte de l'étude et état de l'art	21
I) Contexte de l'étude, problématiques et objectifs	21
I – 1) La Champagne viticole	21
a) L'AOC Champagne	21
b) Le vignoble Champenois.....	21
c) Présentation du Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne (CIVC).....	21
I - 2) Des pratiques en évolution en Champagne.....	23
a) L'entretien des sols	23
b) L'apport d'azote.....	23
I – 3) Les enjeux et problématiques actuelles du vignoble champenois	25
I – 4) Problématiques et démarches de l'étude.....	25
II) Etat de l'art : déterminant de la vigueur de la vigne	27
II – 1) Définitions de la vigueur et rappels fondamentaux sur la physiologie de la vigne.....	27
a) Définitions de vigueur, puissance et expression végétative	27
b) La physiologie de la vigne en lien avec son milieu.....	27
II – 2) L'environnement de la vigne et son impact sur la vigueur	27
a) L'eau	27
b) Le sol.....	29
II – 3) Les effets des pratiques culturales sur la vigueur de la vigne.....	31
a) L'impact du système de conduite sur la vigueur de la vigne	31
b) Fertilisation et vigueur de la vigne	33
c) Entretien du sol et vigueur de la vigne	35
Partie 2 : Matériels et méthodes	39
I) Démarche de l'étude	39
II) Présentation des parcelles du Réseau Vigueur	39
II - 1) Les parcelles du Réseau Vigueur	39
II - 2) Les modalités mises en place sur les parcelles	41
III) Description des variables suivies et de leurs mesures	41
III - 1) Données liées à la physiologie de la vigne.....	41
a) Mesure de la biomasse et du diamètre des sarments via le Physiocap®	43
b) Mesures à floraison et véraison	45
c) Mesure des données à la vendange.....	47
III - 2) Données liées au sol	47
a) Stratégie d'échantillonnage des données relatives aux modalités.....	49
b) Obtention des données	49
IV) Méthode d'analyse des données	49
IV – 1) Impact des pratiques sur la physiologie de la vigne	49
a) Vérification de l'homogénéité des parcelles avant la mise en place des essais	49
b) Analyse des données physiologiques	49
IV – 2) Impact des pratiques sur le sol.....	55
a) Impact des pratiques sur les reliquats azotés.....	55
b) Impact du travail du sol sur l'humidité du sol	55
Partie 3 : Résultats et discussions	57
I) Mise en évidence de l'impact des pratiques sur la physiologie de la vigne	57

I-1) Vérification de l'homogénéité spatiale de la vigueur des parcelles avant la mise en place des modalités	57
I-2) Analyse des données écophysiologicals à floraison et véraison.....	57
a) Floraison	57
b) Véraison.....	61
I-3) Analyse des données à la vendange.....	65
a) Essai fertilisation.....	65
b) Essai entretien du sol.....	67
I-4) Analyse des données à la dormance	69
a) Essai fertilisation.....	69
b) Essai entretien du sol.....	71
II) Etude de l'impact des pratiques sur le sol	71
II-1) Impact des pratiques sur les reliquats azotés	71
a) Essai fertilisation.....	71
b) Essai entretien du sol.....	73
II-2) Impact des pratiques sur l'humidité du sol	75
Conclusion.....	77

Liste des figures

Figure 1 - Carte de la Champagne viticole.....	20
Figure 2 - Evolution de l'enherbement (tout type d'enherbement compris) en Champagne (CIVC, 2019) .	22
Figure 3 - Evolution de l'azote total des moûts sur le "Réseau matu CIVC" au cours du temps (CIVC, 2019)	22
Figure 4 - Evolution du rapport C/N des sols en Champagne depuis 1994 (CIVC,2019)	24
Figure 5 - Absorption de l'azote par la vigne en fonction des stades phénologiques (IFV, 2019).....	28
Figure 6 – Dynamique de l'eau en rapport avec la position topographique (gauche) et la fracturation du substrat (droite) (Carbonneau et al, 2015).....	28
Figure 7 - Cycle du carbone dans le sol (schéma personnel).....	30
Figure 8 - Cycle de l'azote dans le sol (schéma personnel)	30
Figure 9 - Impact des pratiques culturales sur la vigne et sa vigueur (schéma personnel).....	32
Figure 10 - Impact de l'enherbement sur la vigueur et le rendement de la vigne au cours du temps sur sol fertile (ITV France ; 2002).....	36
Figure 11 - Données étudiées liées à la vigueur sur le Réseau Vigueur	38
Figure 12 - Positionnement géographique des parcelles du Réseau Vigueur	38
Figure 13 - Schéma des modalités des parcelles de l'essai entretien du sol avec leurs placettes	40
Figure 14 - Schéma des modalités des parcelles de l'essai fertilisation avec leurs placettes	40
Figure 15 - Modification des zones spatiales des modalités sur la parcelle de Villers entre 2018 et 2019 .	42
Figure 16 - Représentation des mesures physiologiques réalisées aux différents stades phénologiques...	44
Figure 17 - Schéma de fonctionnement du micromètre laser du Physiocap (Le Vignerons Champenois, décembre 2014)	44
Figure 18 - Représentation de la surface foliaire totale en fonction des jours julien et des vitesses de croissance de la surface foliaire totale associés.....	46
Figure 19 - Résumé des variables étudiées sur les différentes périodes	48
Figure 20 – Schématisation du procédé de calcul de la valeur d'une modalité par rapport au témoin ; Exemple du calcul de la valeur de SFT par rapport au témoin pour la modalité engrais minéral.....	50
Figure 21 - Exemple de la valeur appliquée à la modalité engrais minéral pour l'azote des feuilles et des rameaux pour la parcelle des Riceys en 2019 à floraison pour l'analyse des données interparcelles	50
Figure 22 - Cheminement d'analyse des données écophysiologiques du Réseau Vigueur	52
Figure 23 – ANOVA1 réalisée sur les diamètres moyens des sarments mesurés par le Physiocap® en fonction des zones spatiales choisies pour la mise en place des modalités des parcelles pour l'essai de fertilisation	56
Figure 24 – ANOVA1 sur les diamètres moyens des sarments mesurés par le Physiocap® en fonction des zones spatiales choisies pour la mise en place des modalités des parcelles pour l'essai travail du sol	56

Figure 25 - Radar des variables par rapport au témoin à floraison pour la parcelle des Riceys en 2018 (gauche) et 2019 (droite) ; Azote F+R = Stock d'azote des feuilles et des rameaux ; MS / B = masse sèche produite sur biomasse ; Vitesse SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale	58
Figure 26 - Radar des variables pédoclimatiques de chaque parcelle par rapport à la moyenne des trois parcelles	60
Figure 27 - Radar des variables par rapport au témoin à floraison pour les différentes parcelles de l'essai entretien du sol en 2018 (haut) et 2019 (bas) ; Azote F+R = Stock d'azote des feuilles et des rameaux ; MS / B = masse sèche produite sur biomasse ; Vitesse SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale	62
Figure 28 - Radar des variables par rapport au témoin à véraison pour la parcelles des Riceys en 2018 (gauche) et 2019 (droite) ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes	64
Figure 29 - Radar des variables par rapport au témoin à véraison pour la parcelle de Vaudemange en 2018 (gauche) et 2019 (droite) ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes	66
Figure 30 - Azote total des moûts des parcelles de Belval et des Riceys en 2018.....	66
Figure 31 - Rendements des parcelles de Belval et des Riceys en fonction des modalités en 2018.....	68
Figure 32 - Azote total des moûts en fonction des parcelles et des modalités de l'essai entretien du sol en 2018.....	68
Figure 33 - Rendements des parcelles de l'essai entretien du sol en fonction des parcelles et des modalités en 2018.....	70
Figure 34 – Résultats de l'ANOVA1 du diamètre des sarments des parcelles de Villers et de Belval en fonction des modalités suite à la première année de mise en place des modalités	72
Figure 35 – Résultats de l'ANOVA1 sur le diamètre des sarments de la parcelle de Festigny avant (2017 à gauche) et après (2018 à droite) mise en place de la première année de modalités	72
Figure 36 - Reliquats azotés en fonction du temps pour les parcelles de l'essai fertilisation en 2019	74
Figure 37 - Pluviométrie et température sur la parcelle de Villers lors de la période d'étude des reliquats azotés	74
Figure 38 - Reliquats azotés en fonction du temps pour les parcelles de l'essai entretien du sol en 2019 .	76
Figure 39 - Humidité pondérale du sol en fonction des modalités pour les différentes parcelles de l'essai entretien du sol	76
Figure 40 - Analyse SWOT réalisée sur l'expérimentation du Réseau Vigueur	78

Liste des tableaux

Tableau 1 - Principales spécificités de l'AOC Champagne	20
Tableau 2 - Quantité d'azote à apporter à la parcelle en fonction de la vigueur de la vigne (IFV, 2019)	32
Tableau 3 - Quantités de fertilisants apportées sur les parcelles de l'essai fertilisation	42
Tableau 4 – Tableau résumant les différentes variables écophysiologiques étudiées	52
Tableau 5 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai fertilisation à floraison 2018 et 2019; Azote = Stock d'azote des feuilles et rameaux, MS/B = Masse sèche produite à floraison sur biomasse de l'année N-1, Vitesse de croissance de la SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale	58
Tableau 6 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à floraison et des tests ANOVA1 réalisés en 2018 sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités.....	58
Tableau 7 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai entretien du sol à floraison 2018 et 2019 ; Azote = Stock d'azote des feuilles et rameaux, MS/B = Masse sèche produite à floraison sur biomasse de l'année N-1 ; Vitesse SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale.....	60
Tableau 8 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à floraison pour l'essai entretien du sol et des tests ANOVA1 réalisés en 2018 sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités.....	60
Tableau 9 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai fertilisation à véraison ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes	62
Tableau 10 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à véraison et des tests ANOVA1 réalisés sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités et des années pour l'essai fertilisation	64
Tableau 11 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai travail du sol à véraison ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes	64
Tableau 12 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à véraison et des tests ANOVA1 réalisés sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités et des années pour l'essai entretien du sol.....	66
Tableau 13 – Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur l'azote des moûts par rapport au témoin de l'essai entretien du sol en 2018	68
Tableau 14 – Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur le rendement par rapport au témoin en fonction des modalités des parcelles de l'essai entretien du sol en 2018	70
Tableau 15 –Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur l'évolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017 des parcelles de l'essai fertilisation en fonction des modalités	70
Tableau 16 – Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur l'évolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017 des parcelles de l'essai entretien du sol en fonction des modalités	72

Sigles et abréviations

AAW : Apparent Available Water

AM : Amendement

ANOVA1 : Analyse de la variance à un facteur

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée

ATP : Adénosine-Triphosphate

C/N : Carbone / Azote

CAMA : Chaîne d'Analyse Marne Ardennes

CIVC : Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne

GPS : Global Positioning System

EM : Engrais minéral

EO : Engrais organique

FTSW : Fraction of Transpirable Soil Water

IFV : Institut Français de la Vigne et du Vin

INAO : Institut National de l'Origine et de la Qualité

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ITV : Institut Technique de la Vigne et du Vin

MO : Matière Organique

NF U : Normes Françaises des matières et objets utilisés en agriculture

RFU : Réserve Facilement Utilisable

RU : Réserve Utile

RS : Réserve de Survie

SFT : Surface foliaire totale

SIG : Système d'Informations Géographiques

STICS : Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standards

TTSW : Total Transpirable Soil Water

Introduction

La prise de conscience de l'impact de l'agriculture sur l'environnement et de la nécessité de le préserver (Le Cacheux, 2012) fait évoluer les pratiques agricoles. C'est le cas pour la viticulture qui voit ses pratiques conventionnelles évoluer peu à peu vers des pratiques plus durables qui devront bientôt atteindre le 0 herbicide. La Champagne vise, depuis toujours, l'excellence mondiale des vins effervescents et se doit donc de s'adapter à ces nouvelles pratiques. C'est dans ce cadre que la certification Viticulture Durable en Champagne a vu le jour en 2001. Elle vise à réduire au minimum l'impact des pratiques viticoles sur l'environnement (air, climat, eau, sol, biodiversité et paysage), en couvrant plus de 120 points dans son référentiel. Parmi les points abordés, on retrouve la nutrition du sol et de la vigne et l'entretien des sols qui sont des sujets majeurs actuellement en Champagne. En effet, de plus en plus les professionnels de la filière se tournent vers des itinéraires techniques sans herbicides et abandonnent peu à peu les engrais minéraux.

La mise en place de ces nouvelles pratiques n'est pas sans conséquences pour le vignoble champenois. Il est possible de citer pour exemple qu'une diminution générale de la vigueur des parcelles enherbées a été observée. Nettement visible sur le terrain, elle est également mesurable via des capteurs. De plus, elle impacte significativement la qualité et la quantité de production mais également les caractéristiques œnologiques des moûts qui en sont issus.

Il est donc essentiel pour le Comité Champagne de comprendre plus précisément l'origine de cette diminution de vigueur et de déterminer des leviers de fertilisation ou d'entretien du sol pour la redresser ou la maintenir. L'enjeu à l'avenir est de pouvoir proposer des solutions concrètes aux Maisons et aux Vignerons pour abandonner les herbicides sur leur vignoble sans observer de trop forte baisse de vigueur sur les vignes.

Les problématiques de cette étude sont les suivantes : quels sont les impacts de la stratégie d'entretien du sol sur la vigueur de la vigne ? Quelles stratégies de fertilisation permettent de limiter la baisse de vigueur de la vigne suite à la mise en place d'un enherbement ? Comment les pratiques de fertilisation et d'entretien du sol impactent l'azote présent dans le sol et son humidité ?

Pour y répondre, un dispositif de trois parcelles historiquement désherbées avec des modalités d'entretien du sol et de trois parcelles historiquement enherbées avec des modalités de fertilisation ont été mises en place. Ces parcelles visent à permettre de déterminer à terme les meilleures stratégies de fertilisation et d'entretien du sol grâce à une meilleure connaissance de l'écophysologie du vignoble.

La première partie de cette étude expose le contexte, les problématiques et les objectifs de l'étude ainsi que l'état de l'art sur les facteurs de la vigueur de la vigne. Une deuxième partie présente le matériel et les méthodes mobilisées pour l'étude réalisée. La troisième partie constitue une analyse et une hiérarchisation de l'impact des stratégies d'entretien du sol et de fertilisation en lien avec la vigueur. Les résultats obtenus au cours de l'étude seront ensuite discutés et comparés à la bibliographie. L'objectif étant de pouvoir mettre en évidence des itinéraires techniques sans herbicides permettant de maintenir ou de restaurer la vigueur de la vigne.

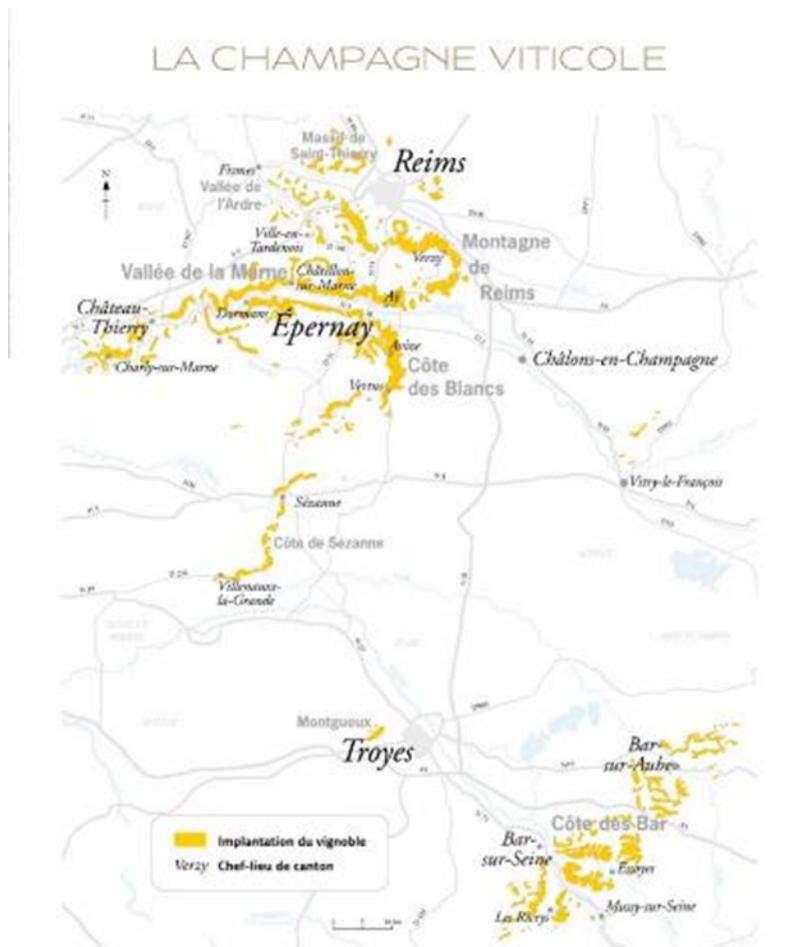


Figure 1 - Carte de la Champagne viticole

Tableau 1 - Principales spécificités de l'AOC Champagne

Règles de viticulture	Zone strictement délimitée	AOC Champagne = 34600 ha
	Cépage autorisé	Chardonnay, Pinot noir, Pinot blanc, Pinot gris, <u>Arbane</u> , <u>Petit Meslier</u>
	Porte-Greffe adapté	41B (sol calcaire), <u>Fercal</u>
	Taille	Royat, Chablis, Guyot, Vallée de la Marne
	Plantation	Ecartement entre les rangs <1,50m 0,9m < écartement entre le cep < 1,50m
Règles de vendange	Chantier de cueillette	Vendanges manuelles, date de début fixée par l'article D. 645-6 du code rural et de la pêche maritime
	Rendement	Fixé annuellement par le CIVC, en 2017 : 10 300 kg/ha + 500kg/ha de réserve
	Degré	TAV naturel minimum de 9°C
Règles de pressurage	Pour un marc (=4000 kg) de raisin ; cuvée = 2050 <u>hL</u> et taille = 500L pour un total de 2550L	
Règles à chaque étape du processus d'élaboration	Deuxième fermentation en bouteille et maturation sur lies pendant 15 mois minimum pour les non millésimés, 36 mois pour les millésimés	

Partie 1 : Contexte de l'étude et état de l'art

I) Contexte de l'étude, problématiques et objectifs

I – 1) La Champagne viticole

a) L'AOC Champagne

L'AOC Champagne a été reconnue par l'INAO le 29 juin 1936. Située à environ 150 kilomètres à l'Est de Paris, elle comprend 320 crus (communes) différents répartis dans huit grandes régions dont la Montagne de Reims, la Vallée de la Marne, la Côte des Blancs et la Côte des Bar (*figure 1*) (CIVC 2019).

L'ensemble des règles de l'AOC Champagne sont définies dans le cahier des charges de l'appellation. Ces règles sont régulièrement optimisées pour tendre vers une meilleure qualité des produits et une adaptation aux nouveaux enjeux de la filière. Les principales spécificités du cahier des charges sont résumées dans le *tableau 1*.

b) Le vignoble Champenois

Le vignoble champenois couvre aujourd'hui 34 000 hectares. Le morcellement du vignoble est tel que la superficie moyenne d'une parcelle est de 18 ares (CIVC, 2019), avec des exploitations d'une taille moyenne de 2,4 ha contre 9 ha au niveau national (Vitisphère, 2011).

La Champagne est le vignoble le plus septentrional de France. Il se situe autour de Reims et d'Épernay qui sont respectivement à 49°5 et 49° de latitude Nord, ce qui le place, actuellement, aux limites de culture de la vigne.

Il est soumis à un climat majoritairement de type océanique qui subit des influences continentales. Le climat océanique lui apporte des quantités d'eau régulières avec des contrastes thermiques généralement peu marqués d'une saison à une autre, alors que le climat continental est responsable de températures faibles, en hiver mais aussi d'un ensoleillement favorable en été. L'insolation du vignoble reste assez faible avec une valeur annuelle moyenne de 1 629 heures (CIVC, 2019) contre 2 035 heures à Montpellier et 1849 heures à Dijon (Météo France, 2019). La pluviométrie est régulière mais modérée, le niveau de pluie annuel se situe aux environs de 604 mm contre 944 mm à Bordeaux ou 760 mm à Dijon. Au niveau des températures, la moyenne annuelle est d'environ 11 degrés Celsius avec des écarts thermiques annuels faibles.

c) Présentation du Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne (CIVC)

Le CIVC est un organisme semi-public, créé en 1941, qui a pour but de gérer les intérêts communs des Vignerons (au nombre de 16 000) et des Maisons (au nombre de 320) de Champagne. Il rassemble donc l'ensemble des Vignerons et des Maisons de Champagne et couvre un grand ensemble de missions à la fois économiques, juridiques, promotionnelles et techniques. Au niveau technique, le Comité Champagne joue un rôle très important dans le développement de pratiques et de méthodes visant à l'amélioration qualitative du vignoble et des vins de Champagne. Pour cela, le Service Technique & Environnement réalise près de 200

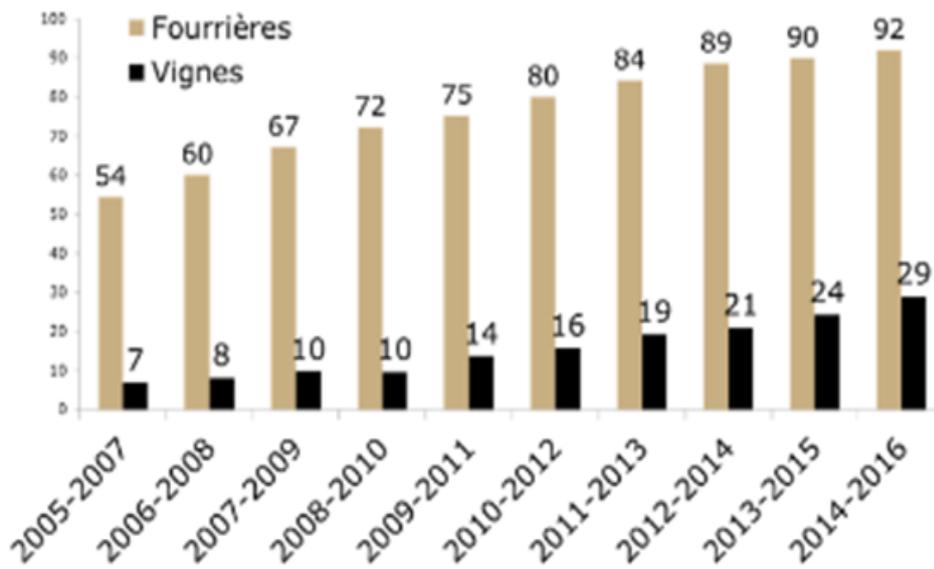


Figure 2 - Evolution de l'enherbement (tout type d'enherbement compris) en Champagne (CIVC, 2019)

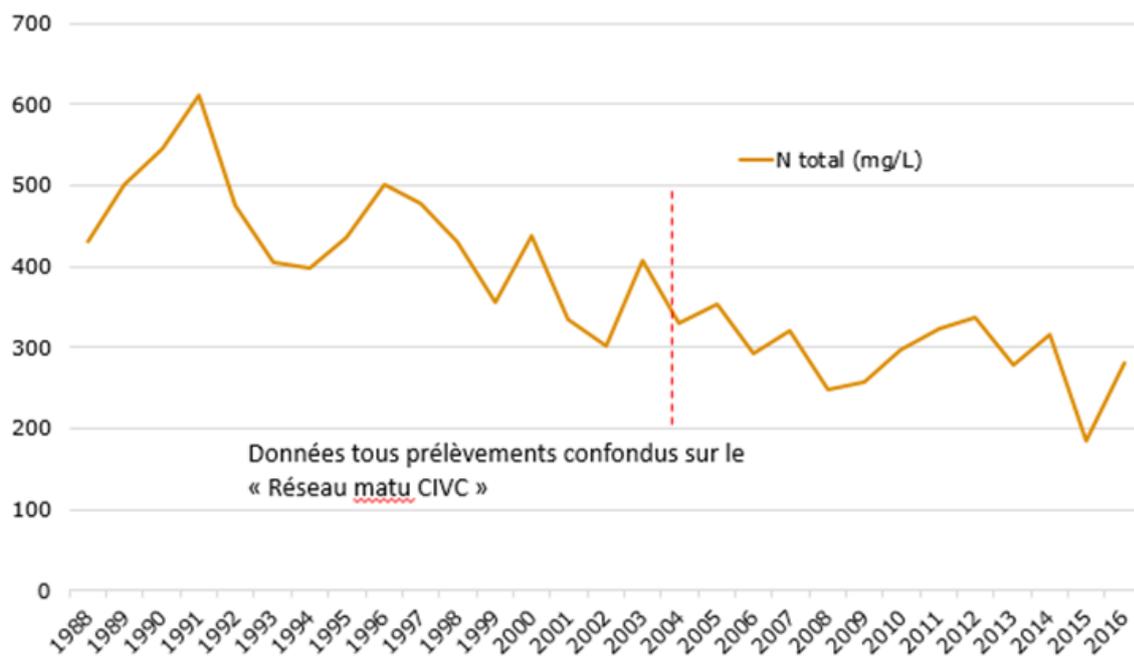


Figure 3 - Evolution de l'azote total des moûts sur le "Réseau matu CIVC" au cours du temps (CIVC, 2019)

expérimentations chaque année ayant pour but la diffusion et le transfert des connaissances auprès des professionnels de la filière. Ces expérimentations et démarches s'inscrivent dans une volonté de réponse aux enjeux viticoles, vinicoles et environnementaux dans le cadre du développement durable auprès des professionnels de la filière.

I - 2) Des pratiques en évolution en Champagne

La Champagne, depuis plusieurs années, observe une nette évolution de ses pratiques aussi bien au niveau de l'entretien du sol que de la fertilisation et de la protection phytosanitaire du vignoble. Cette évolution s'enregistre dans le cadre du plan Ecophyto II+ qui vise à réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques de moitié au niveau agricole d'ici à 2025 et à la sortie du glyphosate pour une majorité des usages d'ici à 2020.

a) L'entretien des sols

A la fin des années 80, 97% des parcelles de l'AOC Champagne étaient désherbées chimiquement en plein. A la fin des années 2000 ces parcelles représentaient 70% de l'AOC (Descôtes et Moncomble, 2013), soit une diminution de 28% des parcelles désherbées chimiquement.

Afin de limiter l'utilisation des herbicides, de nouvelles pratiques d'entretien du sol sont apparues sur le vignoble. Le développement du désherbage chimique localisé sous le rang a aujourd'hui atteint un grand nombre de parcelles, il est généralement associé à une gestion de l'inter-rang avec des couverts hivernaux, des écorces, de l'enherbement (permanent ou hivernal) ou bien encore avec un travail mécanique du sol. Les parcelles sans désherbage chimique recouvrent une surface de l'AOC de plus en plus grande, elles sont le plus souvent travaillées mécaniquement sur le rang et enherbées ou travaillées mécaniquement entre les rangs. En 2015, d'après l'enquête du Comité Champagne sur les indicateurs de développement durable, 16,8% de la surface totale du vignoble suivait une stratégie d'enherbement sur l'inter-rang et de travail mécanique sous le rang.

Les diminutions des quantités d'herbicides utilisées ont été inversement proportionnelles au développement de l'enherbement aussi bien au niveau des vignes que des fourrières (*figure 2*). Alors que les vignes enherbées ne représentaient que 7% de l'appellation entre 2006 et 2007, elles représentaient près d'un tiers de l'AOC (35%) en 2018 (Bonomelli et al, 2019).

b) L'apport d'azote

Les quantités d'apports d'azote dans les parcelles ont diminué de plus de moitié depuis le début des années 90 (Magister, 2018) en Champagne viticole. Cette diminution se répercute au niveau des moûts qui possédaient en moyenne des valeurs d'azote total supérieures à 400 mg.L-1 à la fin des années 90 et qui, maintenant, possèdent des valeurs moyennes plus proches de 300 mg.L-1 (*figure 3*).

Dans le même temps, l'utilisation des apports minéraux a fortement diminué au profit d'apports organiques. Peu d'études ont été réalisées sur les quantités d'apport de fertilisants, mais cette tendance se globalise à l'échelle de la Champagne.

Du point de vue du carbone, l'ajout en masse de composts urbains ainsi que d'amendements ont eu pour effet de fortement augmenter le taux de matière organique et donc de carbone dans les sols. Le rapport C/N des sols champenois est ainsi passé de 10 en 1995 à 13 en 2009. La

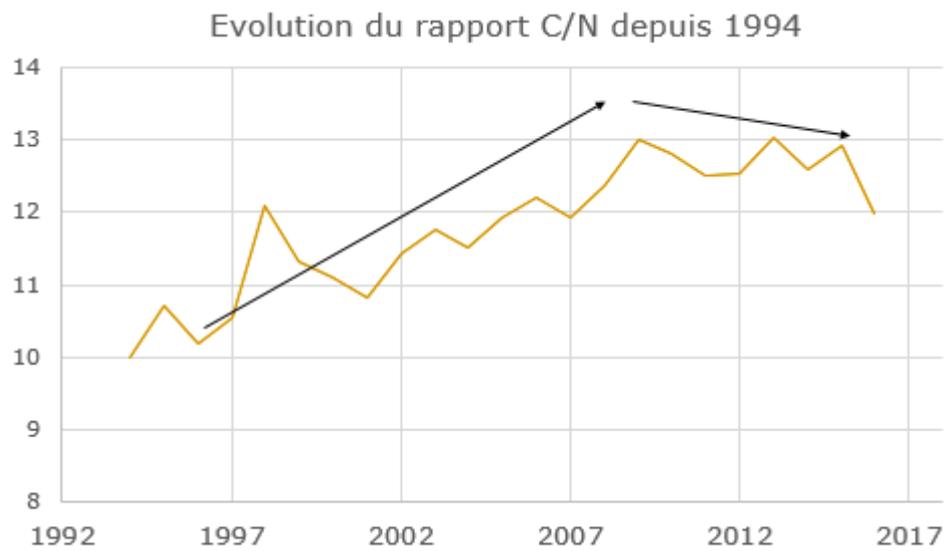


Figure 4 - Evolution du rapport C/N des sols en Champagne depuis 1994 (CIVC,2019)

prise de conscience de l'impact négatif d'un rapport C/N trop élevé sur les sols a permis de commencer à réduire l'évolution de ce rapport depuis les années 2010 (*figure 4*).

I – 3) Les enjeux et problématiques actuelles du vignoble champenois

Dans un vignoble où les parcelles désherbées chimiquement représentent encore une grande partie du vignoble, l'arrêt de l'utilisation des herbicides est un sujet d'actualité majeur. Le plan Ecophyto II+ prévoyant la « sortie du glyphosate pour une majorité de ses usages d'ici à fin 2020 » laisse peu de temps au vignoble champenois pour s'adapter.

De nombreux vigneron et certains négociants ont d'ores-et-déjà abandonné les herbicides et modifié leurs pratiques en travaillant les sols et/ou en utilisant l'enherbement. Cependant, ces nouveaux itinéraires culturaux ont vu l'apparition de différentes difficultés écophysiologicals comme la diminution de la vigueur, la diminution du rendement, l'augmentation du stress hydro-azoté ou des difficultés mécaniques : choix du bon outil limité par une forte densité de plantation

I – 4) Problématiques et démarches de l'étude

C'est dans ce contexte que s'inscrit le Réseau Vigueur du Comité Champagne. Ce Réseau correspond à un ensemble de parcelles sur lesquelles sont suivis différents indicateurs écophysiologicals et climatiques. Il a pour but de comprendre l'impact de différentes pratiques d'entretien du sol et de fertilisation à l'échelle du vignoble champenois. Le travail mené consiste à suivre un ensemble d'indicateurs écophysiologicals et pédoclimatiques en lien avec la vigueur et les facteurs l'influençant. L'objectif est d'étudier les stratégies d'entretien du sol et de fertilisation permettant de maintenir ou restaurer la vigueur de la vigne dans différents contextes pédoclimatiques. Cela passe par une meilleure connaissance du fonctionnement écophysiological de la vigne dans le contexte champenois

Les hypothèses à tester et valider au cours de cette étude sont :

- Il existe un impact du type de fertilisant utilisé (engrais minéral, engrais organique ou amendement) sur la vigueur de la vigne
- Il existe des différences d'efficacité de ces fertilisants en fonction des données pédoclimatiques des parcelles
- Il existe un impact des pratiques d'entretien du sol sur la vigueur de la vigne
- L'impact de ces pratiques est différent en fonction des données pédoclimatiques des parcelles
- Il est possible de décomposer la notion de vigueur selon différents indicateurs écophysiologicals (stress hydrique, stress azoté, surface foliaire, poids des bois de taille, rapport feuille sur fruit)
- Il existe un impact des pratiques de fertilisation et d'entretien du sol sur les reliquats azotés du sol
- Il existe un impact des pratiques d'entretien du sol sur l'humidité du sol

II) Etat de l'art : déterminant de la vigueur de la vigne

II – 1) Définitions de la vigueur et rappels fondamentaux sur la physiologie de la vigne

a) Définitions de vigueur, puissance et expression végétative

La vigueur de la vigne est définie comme le rythme et l'intensité de la croissance du rameau. En pratique, elle est le plus souvent estimée par le poids moyen du sarment après la taille. (Carbonneau et al, 2015). Elle est souvent confondue avec l'expression végétative de la vigne. Pour rappel, cette dernière dépend de la puissance de la vigne qui correspond au poids de matière sèche totale produit par un individu. L'expression végétative se définit alors comme la fraction de la puissance due aux organes végétatifs. Elle est estimée pour une population ou un individu par le poids des bois de taille (t/ha) ou (kg/cep).

Il est ainsi possible de posséder une forte vigueur et une faible expression végétative et inversement (Champagnol, 1984).

b) La physiologie de la vigne en lien avec son milieu

Le cep de vigne est la résultante d'une interaction « génotype x environnement ». (Carbonneau et al, 2015).

Le matériel végétal va fortement influencer le développement du plant de vigne aussi bien au niveau du porte-greffe que du greffon. En effet, certains porte-greffes sont reconnus comme possédant une aptitude à apporter une forte vigueur aux greffons comme le 41B, le SO4 alors que d'autres, à l'inverse, tendent à l'affaiblir (420 A, Riparia Gloire). De la même façon, certains greffons sont connus pour être très vigoureux (Chardonnay, Tannat, etc.) alors que d'autres sont plutôt faibles (Cinsault, Gamay).

Malgré l'importance du matériel végétal, d'autres facteurs, externes à la plante vont intervenir dans son développement. Ainsi, certains gènes fonctionnels ne s'exprimeront (ou ne s'exprimeront pas) que sous l'effet de l'environnement interne ou externe de la plante. Il est possible de citer en exemple une augmentation de l'activation de l'ATPase plasmalemmique et un accroissement de la réduction de Fe³⁺ par une réductase ferrique plasmalemmique de la vigne dans le cas d'un milieu avec une carence en fer assimilable.

Les études sur la vigueur de la vigne ne trouvent donc leur pleine réalisation de l'expression de la réalité que lorsqu'on les relie dans une étude comprenant l'interaction « génotype x environnement ».

De plus, il convient dans une étude sur les interactions en lien avec la vigueur de la vigne et son environnement de ne pas découper la séquence climatique selon le calendrier civil uniquement, mais en fonction des stades phénologiques qui mesurent le « temps biologique ».

II – 2) L'environnement de la vigne et son impact sur la vigueur

a) L'eau

L'eau est un facteur primordial du développement de la plante. Elle joue sur la quasi-totalité des processus biologiques qui lui sont liés. Pour la plupart des cultures, le fonctionnement physiologique de la plante se retrouve modifié à partir du moment où la teneur en eau de ces dernières s'écarte de plus de 15% de leur valeur optimale (Cruziat, 1997).

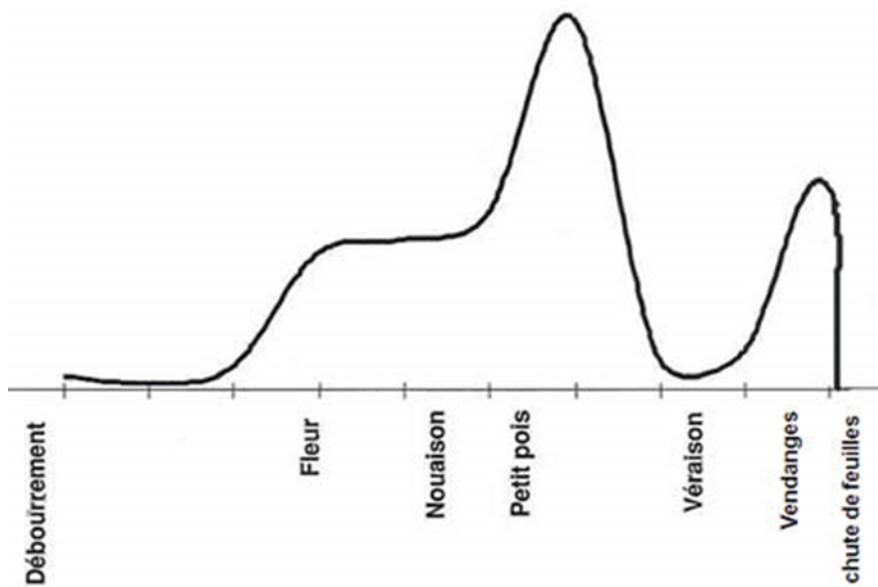


Figure 5 - Absorption de l'azote par la vigne en fonction des stades phénologiques (IFV, 2019)

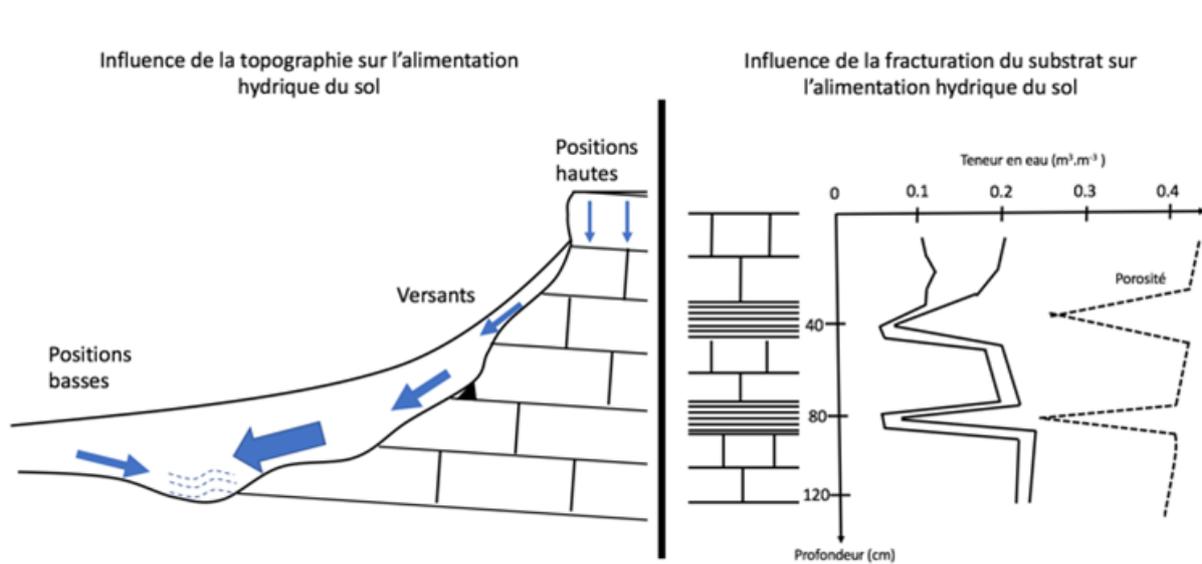


Figure 6 – Dynamique de l'eau en rapport avec la position topographique (gauche) et la fracturation du substrat (droite) (Carbonneau et al, 2015)

En cas de stress hydrique, la vigne va réagir de différentes façons pour éviter des dégâts trop importants. Elle va notamment réguler l'ouverture et la fermeture de ses stomates, provoquant ainsi une diminution de l'assimilation de carbone (Chaves, 1991) et donc un ralentissement de sa production de biomasse (Dorji et al. 2005). La réduction de biomasse touche tout d'abord la croissance végétative qui est plus sensible à la contrainte hydrique que la croissance reproductive ou racinaire (Hsiao et Xu 2000; Wery 2005). Il convient de noter que les effets du stress hydrique seront différents en fonction des stades phénologiques. Durant la phase de croissance végétative, comprise entre le débourrement et la véraison, ses conséquences seront plus importantes. A l'inverse, pendant la phase de maturation des baies, de la véraison jusqu'à la vendange, ses dégâts seront plus faibles.

b) Le sol

Une des principales fonction d'un sol est d'assurer l'alimentation hydrique de la vigne. Elle doit être suffisante au printemps (potentiel hydrique foliaire de base compris entre 0 et 0,4) et modérée (potentiel hydrique foliaire de base compris entre 0,4 et 0,6) en été (Odeja et Saurin, 2014). Il a également d'autres fonctions comme assurer la nutrition minérale de la plante, et plus particulièrement azotée. La vigne prélève entre 20 et 70 kg d'azote par hectare et par an (Delas, 1989), selon la dynamique de la *figure 5*. Il peut également être à l'origine de perturbations de nature physico-chimiques qui pourraient altérer la capacité végétative et productive d'un vignoble.

b.1) Effets des propriétés topographiques, physiques et physico-chimiques sur l'alimentation hydrominérale de la vigne

Différentes variables du sol, comme sa position topographique ou son contexte géomorphologique, vont impacter l'alimentation hydrominérale de la vigne ainsi que sa vigueur et sa biomasse.

Les positions hautes permettent un écoulement gravitaire ou par drainage des eaux, elles sont donc exceptées des problèmes d'excès d'eau. Les problèmes hydriques de ces positions proviennent donc plus régulièrement de sols peu profonds ou de substratums peu tectonisés qui ne permettent pas d'assurer une alimentation hydrique suffisante à la vigne. Les positions de versants sont de façon générale naturellement profondes, très aérées et perméables et constituées de matériaux plutôt grossiers. La faible rétention en eau de ces sols est compensée par un enracinement en profondeur de la vigne capable de capter la fraîcheur rencontrée en fond de profil. Le principal inconvénient de ces sols peut être l'érosion entraînée par la pente et la perte de matériaux fins. Les positions basses présentent des sols majoritairement très profonds et riches en éléments minéraux. Elles sont donc sujettes aux excès d'eau, de fertilité et de vigueur.

Le degré de fracturation du substrat géologique joue un rôle majeur sur l'alimentation hydrique de la vigne. Pour exemple, les sols calcaires de Champagne sont durs et perméables : ils évacuent l'eau en excès en profondeur et les racines se développent en profondeur en atteignant la fraîcheur nécessaire en fin d'été. A l'inverse, les marnes, matériaux tendres, sont peu perforées. Elles ont donc une bonne capacité de rétention en eau, accumulent de l'eau et les racines y pénètrent peu profondément. On peut le résumer sur la *figure 6*.

Les propriétés physico-chimiques des sols impactent la fertilité des sols et donc leur capacité à favoriser la production de biomasse par les cultures. Cependant, dans le cas de la vigne, l'objectif n'est pas de favoriser à l'extrême la production de biomasse. Les propriétés

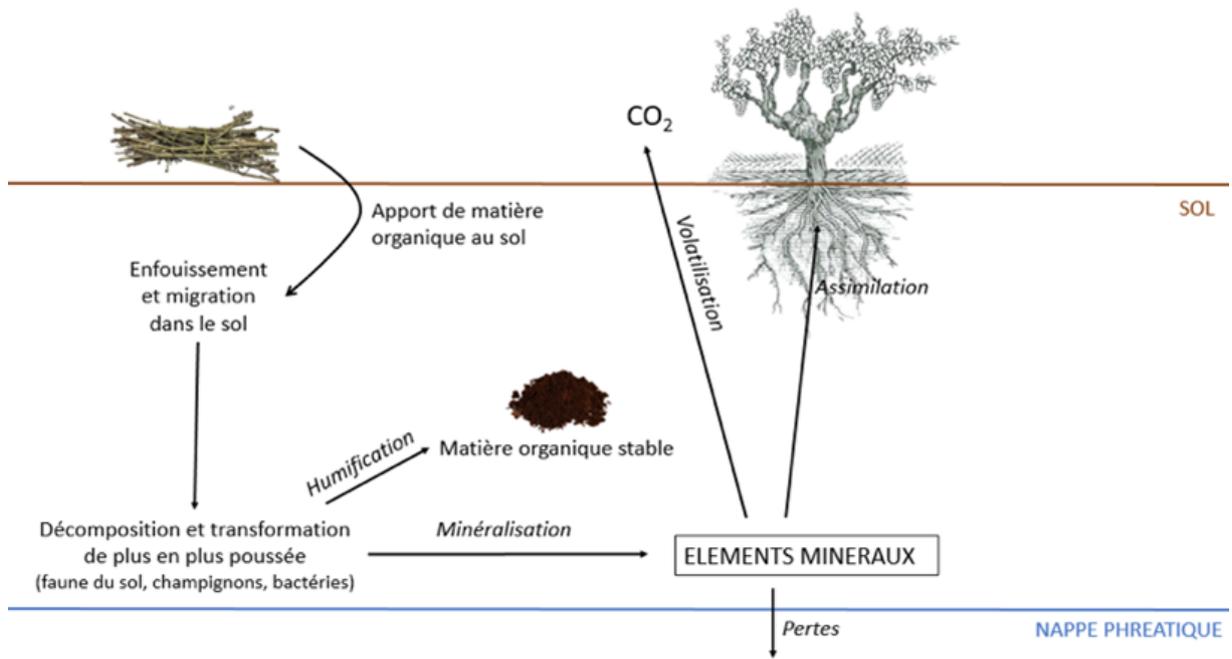


Figure 7 - Cycle du carbone dans le sol (schéma personnel)

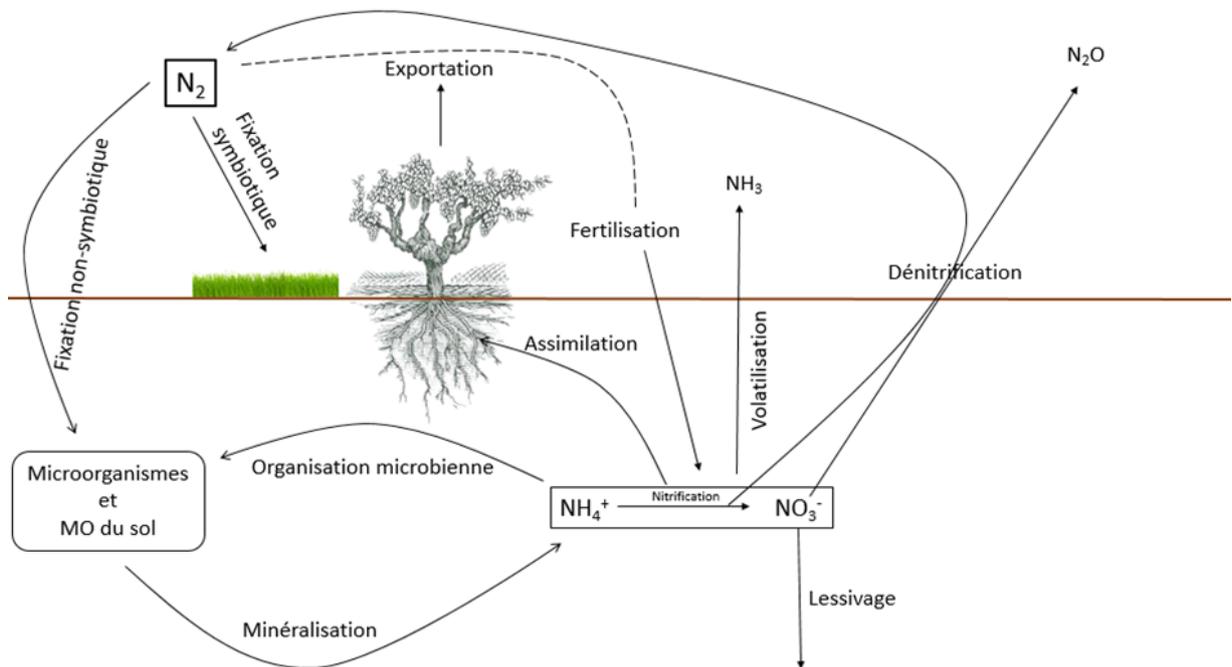


Figure 8 - Cycle de l'azote dans le sol (schéma personnel)

physiques du sol, essentielles à l'enracinement et à l'alimentation hydrique possèdent donc une importance plus grande que ses propriétés physico-chimiques.

b.2) Impacts de la matière organique du sol sur l'alimentation hydrominérale de la vigne

La matière organique est considérée depuis longtemps comme une composante clé du maintien de la fonction des sols. Elle évolue dans le sol comme résumé sur la *figure 7*.

D'un point de vue chimique, la matière organique intervient dans la capacité d'échange cationique et constitue une source d'éléments nutritifs pour les plantes (Bonneau et Souchier, 1979) favorisant ainsi leur production de biomasse. Mais elle peut également améliorer la rétention en eau des sols, limiter sa compaction ou bien encore contribuer à sa stabilité structurale (Soane, 1990 ; Stevenson, 1994).

La matière organique va également impacter le cycle de l'azote au niveau du sol (*figure 8*), en jouant sur sa vitesse de minéralisation et ainsi sur sa disponibilité pour la vigne. En effet, dans les régions tempérées, la minéralisation brute de l'azote est principalement due à la dégradation biologique par les macro et micro-organismes de la matière organique (Jarvis et al., 1996). Un fort taux de matière organique favorisera ainsi, généralement, des vitesses de minéralisation élevées.

II – 3) Les effets des pratiques culturales sur la vigueur de la vigne

Les pratiques culturales impactent directement la vigueur de la vigne, comme le résume la *figure 9* et forment un levier important pour sa gestion.

a) L'impact du système de conduite sur la vigueur de la vigne

Les systèmes de conduites sont définis par un ensemble cohérent de différents paramètres : la géométrie de plantation (densité de plantation et peuplement), la taille, l'architecture et mode de conduite de la végétation et les opérations en vert. La densité de plantation et la taille d'hiver ont un impact très important sur la vigueur.

a.1) Effets de la densité de plantation

La densité de plantation joue un rôle majeur sur la colonisation de l'espace par les ceps, c'est-à-dire le garnissage de l'espace aérien et sous-terrain. On distingue, ainsi, une densité minimale, correspondant à la limite à partir de laquelle la concurrence est atteinte, elle est directement corrélée à la vigueur. Elle est de 800 à 1 000 ceps/ha pour les vignobles très vigoureux, 2 000 ceps/ha pour la plupart des vignobles et 3 000 ceps/ha pour les vignobles à faible vigueur. Et une densité maximale qui est une densité au-delà de laquelle, la puissance individuelle est fortement réduite et celle de la population est incapable d'augmenter. Elle correspond à 10 000 ceps/ha pour la plupart des vignobles et 5 000 ceps/ha pour les vignobles en zone sèche (Carbonneau et al, 2015).

La concurrence au niveau des ceps va se jouer au niveau de différents paramètres, les plus importants sont : la réserve hydrique et minérale du sol et la lumière entre et sur le rang. Du fait de cette concurrence, la puissance individuelle (masse sèche par cep) et la vigueur diminuent avec l'augmentation de la densité de plantation. Il est possible de jouer sur l'architecture de la plante et l'espace inter-rang afin de limiter cette concurrence.

a.2) Effets de la taille

La taille de renouvellement est pratiquée chaque hiver avant le début du cycle végétatif. Elle a différentes fonctions : production, répartition et renouvellement notamment.

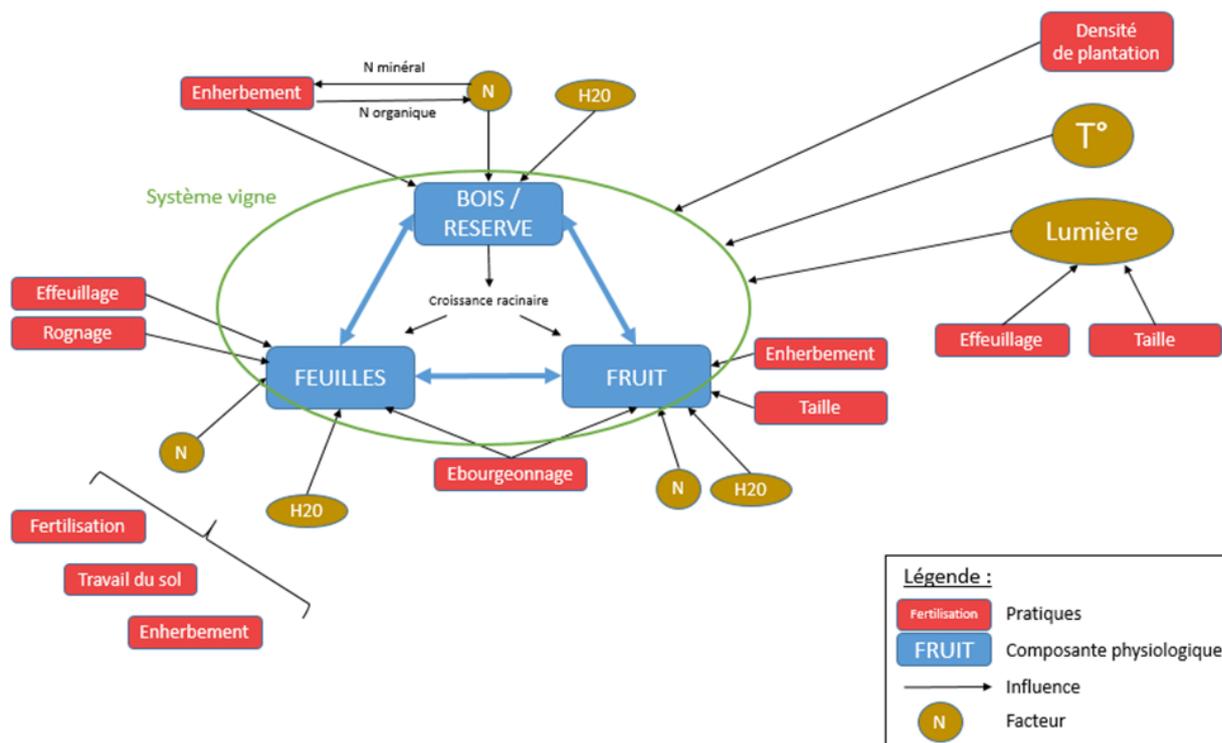


Figure 9 - Impact des pratiques culturales sur la vigne et sa vigueur (schéma personnel)

Tableau 2 - Quantité d'azote à apporter à la parcelle en fonction de la vigueur de la vigne (IFV, 2019)

Vigueur	Apports recommandés
Modérée	20 à 30 kgN/ha
Forte	40 à 60 kgN/ha

Une fonction de production, avec le choix des types et du nombre des bois de tailles, mais aussi de leurs longueurs, qui détermineront la charge en bourgeons. Une fonction de répartition, par le choix du positionnement des bois de tailles en fonction de la forme des structures pérennes. Et une fonction de renouvellement par la prévision de la position des bois de taille lors de la taille de l'année suivante.

La taille assurera également une adaptation de la charge en bourgeons à la puissance du cep (ou à son estimation par le volume de ramification) (Carbonneau et al., 2015).

La charge en bourgeons de la vigne de l'année n va impacter sa vigueur de l'année $n+1$. D'après Carbonneau et al (2015), dès que la charge en bourgeons dépasse huit, la vigueur de la vigne diminue rapidement. Ceci s'explique du fait qu'une charge en bourgeons trop élevée entraîne une diminution des ressources de la souche qui s'épuise alors peu à peu (CIVC, 2019). Il est donc possible de réguler la vigueur de la vigne avec des charges élevées (l'extrême étant atteint pour la charge minimale), mais à des niveaux de production d'entassement de feuillages et de raisins qui peuvent dépasser les seuils recherchés.

b) Fertilisation et vigueur de la vigne

Les produits organo-minéraux sont utilisés depuis très longtemps en agriculture pour améliorer le rendement et la qualité des productions (Boulaine, 1995). Cependant, dans le cas de la vigne, il convient de raisonner les quantités d'apport afin de ne pas fertiliser de manière trop importante et ainsi impacter négativement la qualité des raisins.

b.1 Les besoins azotés de la vigne

L'azote joue un rôle majeur dans la composition de la matière végétale et doit donc être régulé. En viticulture, la grande efficacité de l'azote rend sa gestion difficile. Un apport raisonné d'azote permet d'augmenter, la plupart du temps, la vigueur et le rendement de la vigne (Kliewer, 1977). Cependant, une fertilisation azotée trop importante peut avoir de nombreux effets négatifs sur la qualité de la production : diminution de la teneur en sucre des baies (Champagnol, 1984), augmentation des risques de développement de parasites dans la végétation (Pouget R. et Delas J., 1984), diminution de la teneur en polyphénols des vins et de leur intensité colorante (Peynaud, 1972) et diminution du rendement à cause de l'augmentation de la coulure entraînée par l'excès de vigueur (Delas et al, 1983).

Afin de suivre l'alimentation azotée de la vigne, différents indicateurs peuvent être utilisés. Les plus performants sont l'azote total du limbe (Kliewer, 1991) et l'azote total du moût (van Leeuwen et al., 2000).

Autrement, la quantité d'azote apportée peut se raisonner directement en fonction de la vigueur de la vigne (*tableau 2*).

De façon globale les besoins azotés de la vigne peuvent être satisfaits en partie par la minéralisation de la matière organique du sol qui représente la principale source d'alimentation de la plante (IFV, 2019 et Vignerons champenois mars 2010). La minéralisation est fortement dépendante des conditions pédoclimatiques (température, humidité, taux d'argile, pH). Les besoins de la plante augmentent jusqu'à floraison pour atteindre leur pic à véraison. Pour la période comprise entre débourrement et stade floraison, l'azote est essentiellement fourni par

les réserves accumulées au cours du cycle précédent. A partir du stade floraison, la vigne commence à absorber l'azote du sol de façon notable.

b.2) Effets de la nature du fertilisant sur l'azote apporté

Il existe différents types de produits fertilisants : les engrais et les amendements. Les engrais sont destinés à apporter un ou plusieurs éléments nutritifs à la vigne et répondent à la norme NF U 42-001. Les amendements sont, quant à eux, destinés à l'entretien ou la reconstruction du stock de matière organique du sol. Ils répondent à la norme NF U 44-051 A1.

Pour les amendements, les processus de minéralisation et d'organisation dépendent de leur nature, de leur degré de stabilité et de leur richesse en azote. Les différents rapports en lien avec leur minéralisation et leur organisation sont résumés en annexe I (Jedidi, N., et al, 1994).

Pour les engrais, on peut distinguer différents types : les engrais simples (azotés, phosphatés, potassiques), les engrais composés (minéraux, organiques, organo-minéraux), les engrais apportant du calcium, du magnésium ou du soufre et les engrais à teneur déclarée en oligo-éléments. Parmi eux, les engrais composés minéraux tiennent une grande place en viticulture, du fait de leur concentration, leur homogénéité et leur facilité d'épandage (Delas, 2011). Mais les engrais composés organiques se développent de plus en plus.

De façon générale, les engrais ont une action stimulante sur la minéralisation de l'azote organique endogène et donc la disponibilité d'azote pour la vigne (Jedidi, N. et al, 1994). Ces effets varient en fonction de leur nature. Les engrais organiques conduisent, généralement, à des diminutions de rendement annuel par rapport à des engrais minéraux, comme l'ont montré Jeangros et al (2003) sur les systèmes prairiaux. Mais ils permettent d'améliorer la quantité et la qualité de la matière organique avec des macroagrégations et des potentiels biologiques élevés (N'Dayegamiye et al, 1997). C'est pourquoi la fertilisation minérale prolongée devrait être complétée périodiquement avec des applications d'amendements organiques afin de maintenir la teneur en matière organique et la qualité biologique du sol.

Globalement pour les apports organiques, le potentiel de minéralisation de l'azote diffère selon la nature des produits (Masunga et al, 2016) et est fortement impacté par les conditions climatiques (N'Dayegamiye, 2007) ainsi que le sol. L'efficacité d'apports d'azote sous forme d'engrais organique et d'amendement est donc plus dépendante du sol et du climat que les efficacités d'apports sous forme d'engrais minéraux.

c) Entretien du sol et vigueur de la vigne

Le désherbage chimique est encore souvent décrit comme une technique simple d'utilisation et la moins coûteuse actuellement (Jacquemoud, 2017). Elle permet, aujourd'hui, d'intervenir rapidement dans pratiquement tout type de pente. Elle présente l'avantage de limiter toute concurrence entre la vigne et les adventices, évitant ainsi des diminutions de vigueur de la vigne. Cependant, cette pratique, devenue impopulaire du fait de son impact sur la santé humaine et l'environnement, devrait être interdite suite à l'application du plan Ecophyto II+.

L'enherbement est une alternative au désherbage chimique. Il peut s'envisager de façon temporaire (Garcia et al, 2018), permanent, dans tous les rangs ou non, sur et/ou sous le rang, autant de façon de s'adapter au mieux à la culture de la vigne. Cette pratique possède de nombreux avantages mais également différents inconvénients.

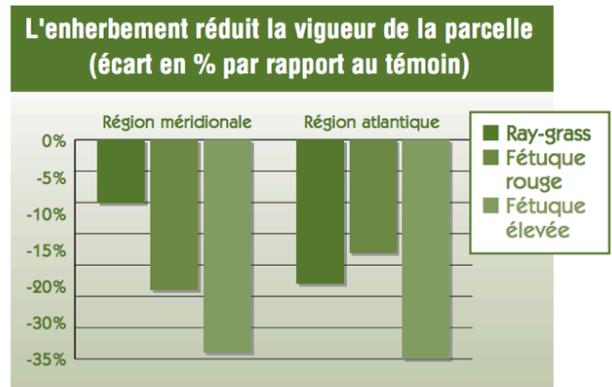
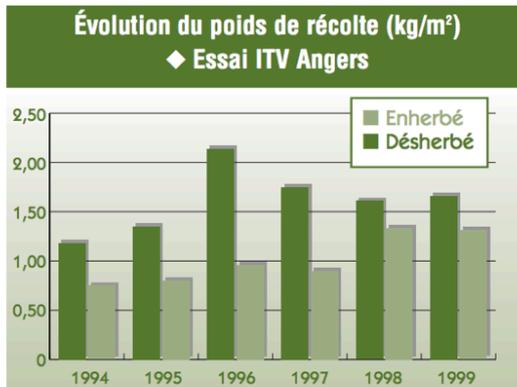


Figure 10 - Impact de l'enherbement sur la vigueur et le rendement de la vigne au cours du temps sur sol fertile (ITV France ; 2002)

Du fait de la concurrence du couvert avec la vigne pour l'exploration racinaire, on peut observer un fort effet dépressif de l'enherbement dans les horizons de surface sur les racines de faibles diamètres ayant une grande efficacité minérale et hydrique (Morlat et Venin, 1981). Cet effet, se retrouve de façon moindre mais existant sur les racines de fort diamètre. Cette concurrence entraîne une diminution des ressources en eau (Celette, 2007) et éléments nutritifs (azote, potassium et oligo-éléments) pour la vigne et possède toujours un impact négatif sur sa vigueur en cas d'enherbement permanent (TECHN'ITAB). Cette réduction dépend de nombreux facteurs dont les variétés de l'enherbement, le climat du millésime et le sol. En effet, sur des sols fertiles et profonds, la vigne a la possibilité d'explorer des horizons plus profonds, la vigueur diminue légèrement les premières années de l'enherbement avant de revenir à la normale et le rendement n'est presque pas affecté (*figure 10*) (ITV France, 2002). A l'inverse, sur des sols pauvres et superficiels, la vigueur et le rendement diminuent fortement suite à la mise en place de l'enherbement et restent les mêmes après plusieurs années (ITV France, 2002). Il convient alors de moduler l'enherbement au mieux par le choix d'espèces peu compétitives ou par un aménagement de la technique.

Malgré certains désavantages, l'enherbement présente de nombreux services écosystémiques. Il permet d'améliorer la structure du sol, via l'implantation racinaire du couvert, et permet aussi de lutter contre les effets néfastes de l'érosion. Il favoriserait également la capacité d'infiltration et de rétention des sols (Celette, 2007). L'enherbement protège également les sols des compactations produites par les passages répétitifs des engins sur les parcelles (Lagacherie et al., 2006), améliore la portance des sols et est source de matière organique (Steenwerth et Belina, 2008). D'un point de vue sanitaire, la diminution de la surface foliaire engendrée par la concurrence avec l'enherbement diminue la pression de maladies cryptogamiques sur la vigne (Valdes Gomez, 2007) et permet une meilleure pénétration des produits phytosanitaires dans le feuillage (Emmett et al. 1998).

Le travail du sol constitue une alternative à la fois au désherbage chimique et à l'enherbement. Il permet d'éviter toute concurrence avec un couvert, favorisant ainsi la vigueur de la vigne, tout en se passant des herbicides.

Si le travail du sol est correctement réalisé, il présentera également des intérêts au niveau du sol. Le labour de surface (0-15 cm) améliore la structure physique du sol et facilite les échanges à la surface du sol notamment au niveau de l'air, de l'eau et des engrais apportés (Coulouma et al., 2006). A l'inverse, un labour trop profond entraîne l'apparition d'une couche dure par l'action du tassement des engins viticoles (Boizard et al., 2002).

De plus, le travail mécanique du sol peut être associé à un risque accru d'érosion et de perte de sol (Mousadek et al, 2010).

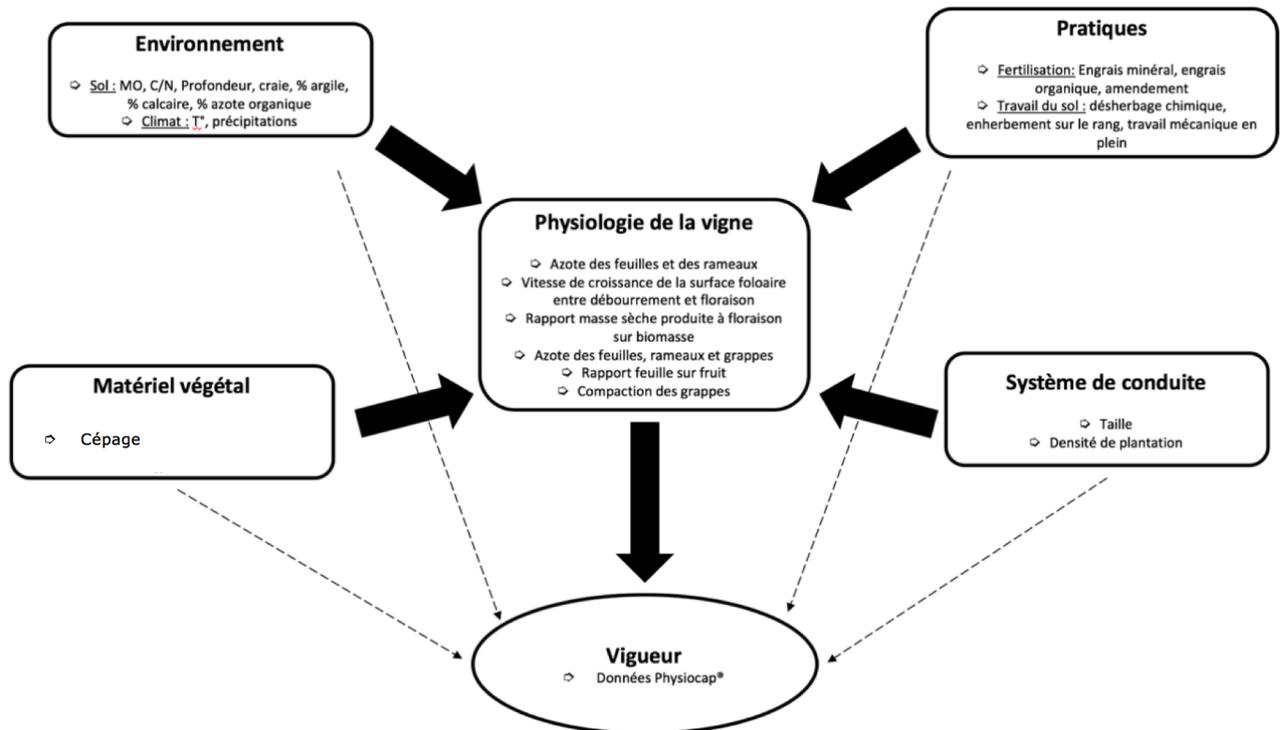


Figure 11 - Données étudiées liées à la vigueur sur le Réseau Vigueur



 Parcelles enherbées
  Parcelles désherbées

Figure 12 - Positionnement géographique des parcelles du Réseau Vigueur

I) Démarche de l'étude

Cette étude vise à comprendre comment les pratiques d'entretien du sol (désherbage chimique, enherbement sur l'inter-rang associé à un travail mécanique sous le rang et travail mécanique sur le rang et l'inter-rang) et les pratiques de fertilisation (engrais minéral, engrais organique et amendement) impactent la vigueur de la vigne en Champagne. Pour cela, cette étude analyse des données physiologiques et pédoclimatiques des millésimes 2018 et 2019. Elle est couplée à une étude visant à calibrer un modèle de culture dynamique (STICS développé par l'INRA) pour la vigne en Champagne permettant de simuler le système sol-atmosphère-culture.

Cette étude a débuté par une recherche des facteurs principaux pouvant expliquer les variations de la vigueur de la vigne. Suite à cela, un ensemble d'indicateurs écophysologiques ont été retenus (*figure 11*) pour suivre l'évolution du développement de la vigne. L'ensemble de ces données sont parallèlement utilisées pour calibrer le modèle de culture dynamique STICS au vignoble champenois.

Dans un premier temps, les données relatives au sol ont été collectées à partir d'analyses de sol de chaque parcelle. Dans un second temps, les données relatives à la vigueur de la vigne et à sa physiologie ont été obtenues respectivement grâce au Physiocap® et à des relevés sur le terrain suivis d'analyses en laboratoire (réalisées à la Chaine d'Analyse Marne Ardennes). Puis, les données climatiques des différentes années ont été recueillies grâce aux stations météorologiques et aux bases de données du CIVC.

La base de données ainsi formée a servi de support tout au long de l'étude pour chercher à comprendre comment les différents facteurs étudiés : matériel végétal, environnement, pratiques, système de conduite et physiologie de la vigne impactent la vigueur de la vigne. L'objectif final visant à déterminer au mieux comment gérer les pratiques de fertilisation et d'entretien du sol afin de pouvoir se passer des herbicides, tout en maintenant ou restaurant la vigueur de la vigne à court et moyen terme.

II) Présentation des parcelles du Réseau Vigueur

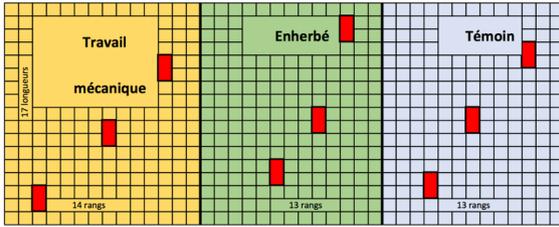
II - 1) Les parcelles du Réseau Vigueur

Le Réseau Vigueur est formé de 6 parcelles présentes en Montagne de Reims, en Vallée de la Marne et dans l'Aube (*figure 12*). Ces parcelles se distinguent en deux classes, la première correspondant à des parcelles avec un historique de désherbage chimique et la seconde correspondant à des parcelles avec un historique d'enherbement, afin d'avoir deux niveaux de vigueur au point zéro de l'essai.

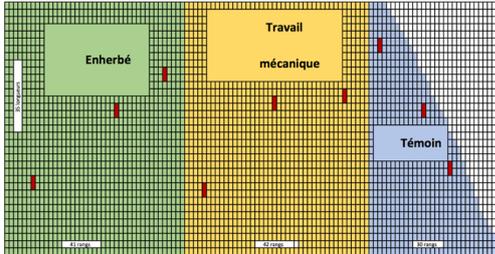
Ces parcelles ont été choisies de façon à représenter au mieux le vignoble champenois. L'absence de la Côte des Blancs dans le Réseau Vigueur s'explique par la difficulté à trouver des parcelles ne comprenant aucun pied atteint par le court-noué (ce qui fausserait les données étudiées).

On retrouve ainsi sur le Réseau : le Chardonnay en Montagne de Reims avec une taille dite en « chablis ». Il est relativement précoce et craint les gelées de printemps dans les terroirs froids. Le Pinot Noir dans l'Aube, il est le cépage majoritaire de la Côte des Bars et se développe

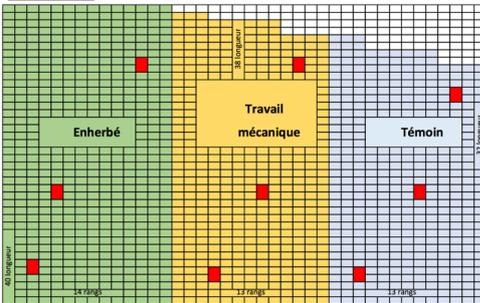
Festigny :



Urville :



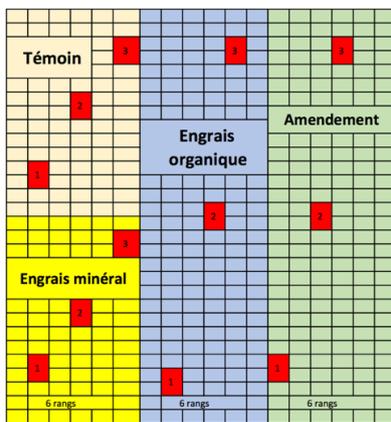
Vaudemange :



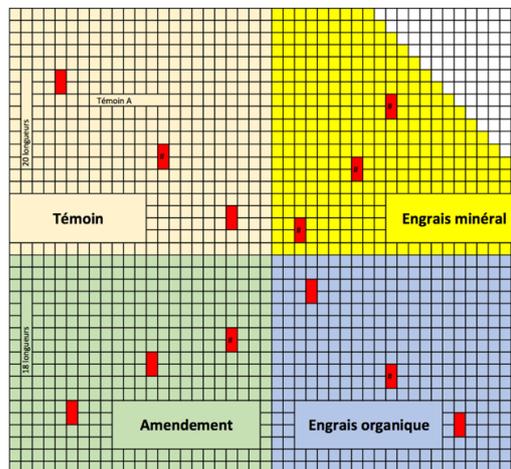
 Placette

Figure 13 - Schéma des modalités des parcelles de l'essai entretien du sol avec leurs placettes

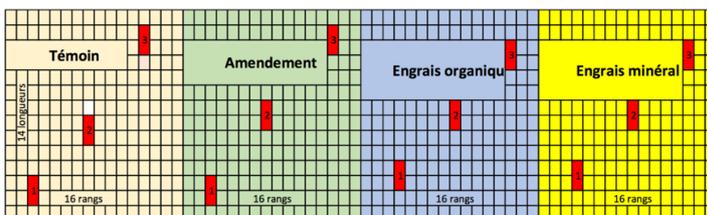
Villers :



Riceys :



Belval :



 Placette

Figure 14 - Schéma des modalités des parcelles de l'essai fertilisation avec leurs placettes

mieux sur des terrains calcaires et frais. Le Meunier en Vallée de la Marne où il est majoritaire. Il convient plutôt aux terroirs plus argileux.

II - 2) Les modalités mises en place sur les parcelles

Pour les parcelles historiquement désherbées, trois modalités d'entretien du sol ont été mises en place sur les parcelles (*figure 13*) :

- Désherbée chimiquement : qui correspond à un témoin où la parcelle est désherbée chimiquement en plein (sur et sous le rang) ; nom de modalité : désherbé
- Travail mécanique en plein du sol : qui correspond à une modalité où la parcelle est travaillée mécaniquement sur et sous le rang ; nom de modalité : travail mécanique
- Enherbée : qui correspond à un enherbement sur le rang et un travail du sol mécanique sous le rang ; nom de modalité : enherbé

Pour les parcelles enherbées, quatre modalités de fertilisation ont été mises en place sur chaque parcelle (*figure 14*) :

- Témoin : qui correspond à un témoin sans apport
- Amendement (AM) : qui correspond à un apport d'amendement au cours de l'hiver
- Engrais organique (EO) : qui correspond à un apport d'engrais organique réalisé à la fin de l'hiver ou début du printemps
- Engrais minéral (EM) : qui correspond à un apport d'engrais minéral liquide au sol au stade 5-6 feuilles

Les apports réalisés en 2018 et 2019 sont détaillés sur le *tableau 3*.

Suite à une erreur lors de la fertilisation sur la parcelle de Villers en 2019, la modalité témoin de l'année 2019 a dû être déplacée sur une partie de la modalité EM de l'année 2018 (*figure 15*).

III) Description des variables suivies et de leurs mesures

III - 1) Données liées à la physiologie de la vigne

Pour chaque modalité, différents indicateurs de la physiologie de la vigne ont été suivis. Ils sont résumés ci-dessous :

Type de variable	Stade phénologique de la mesure	Organes étudiés	Echantillon de la mesure
Biomasse	1 fois à la dormance	Sarments	Mesure de l'ordre du millier de ceps
Diamètre des sarments	1 fois à la dormance	Sarments	Mesure de l'ordre du millier de ceps
Vitesse de croissance de la surface foliaire	1 fois entre débourrement et floraison	Feuille	7 rameaux primaires sur 3 dates

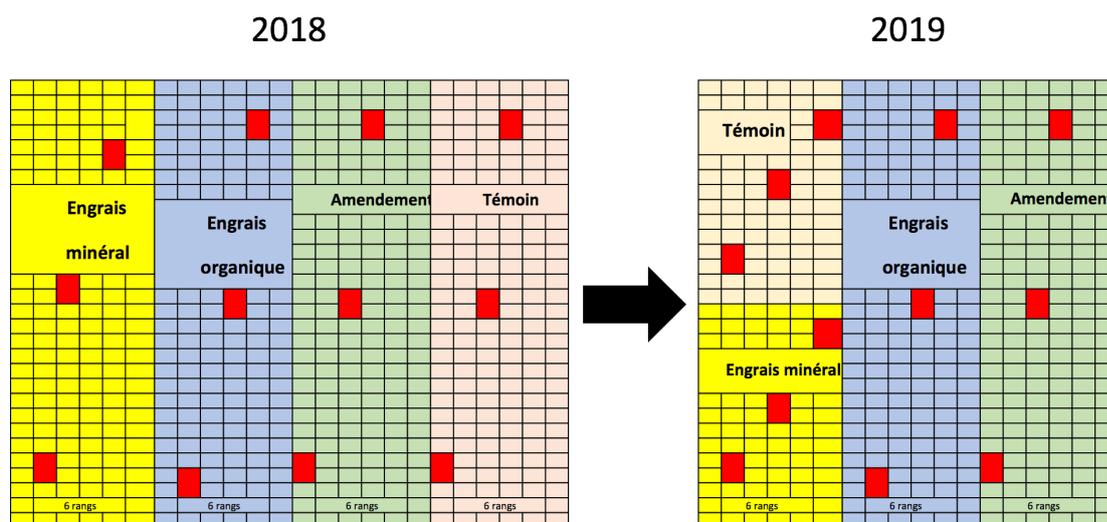


Figure 15 - Modification des zones spatiales des modalités sur la parcelle de Villers entre 2018 et 2019

Tableau 3 - Quantités de fertilisants apportées sur les parcelles de l'essai fertilisation

Lieu	Modalité	Année	Date apport	Apport	Dose (kg/ha)	Volume (L)	Apport azote
Belval	Engrais minéral	2018	09/05/2018	Liquovigne		100	38,7
Belval	Engrais organique	2018	26/02/2018	Bochevo	1500		45
Belval	Amendement	2018	26/02/2018	Fumeterre	2000		38
Belval	Témoin	2018					
Riceys	Engrais minéral	2018	01/05/2018	Liquovigne		100	38,7
Riceys	Engrais organique	2018	14/02/2018	Orga 3	2000		45
Riceys	Amendement	2018	14/02/2018	Fumeterre	2000		38
Riceys	Témoin	2018					
Villers	Engrais minéral	2018	01/05/2018	Liquovigne		100	38,7
Villers	Engrais organique	2018	06/04/2018	Bochevo	1200		45
Villers	Amendement	2018	12/02/2018	Ovi 100	2000		40
Villers	Témoin	2018					
Belval	Engrais minéral	2019	16/05/2019	Liquovigne		100	38,7
Belval	Engrais organique	2019	01/04/2019	Bochevo	1500		45
Belval	Amendement	2019	27/02/2019	Fumeterre	2000		38
Belval	Témoin	2019					
Riceys	Engrais minéral	2019	25/05/2019	Liquovigne		100	38,7
Riceys	Engrais organique	2019	19/02/2019	Orga 3	2000		45
Riceys	Amendement	2019	31/12/2018	Fumeterre	2000		38
Riceys	Témoin	2019					
Villers	Engrais minéral	2019	24/05/2019	Liquovigne		100	38,7
Villers	Engrais organique	2019	20/03/2019	Bochevo	1200		40
Villers	Amendement	2019	01/02/2018	Ovi 100	2000		38
Villers	Témoin	2019					

Azote des feuilles et rameaux	1 fois à floraison	Feuille, rameau	7 rameaux primaires
Masse sèche produite à floraison sur biomasse	1 fois à floraison	Feuille, rameau	7 rameaux primaires
Azote des feuilles, rameaux et grappes	1 fois à véraison	Feuille, rameau et grappe	7 rameaux primaires
Rapport feuille/fruit	1 fois à véraison	Feuille, fruit	7 rameaux primaires
Compaction des grappes	1 fois à véraison	Grappes	Grappes issues de 7 rameaux primaires
Azote des moûts	1 fois à maturité	Grappe	100 baies
Rendement	1 fois à maturité	Grappe	Donné par le viticulteur

L'ensemble de ces prélèvements est schématisé sur la *figure 16*.

a) Mesure de la biomasse et du diamètre des sarments via le Physiocap®

Le Physiocap® est un système d'acquisition de données géolocalisées qui s'embarque sur une machine mobile (le plus souvent une pré-tailleuse) fournissant des informations sur les bois de taille en absence de feuilles, au cours du repos végétatif. Il est composé d'un micromètre laser, d'un GPS et d'un boîtier enregistreur de données.

Le micromètre laser comporte un émetteur et un récepteur, tous les deux positionnés en face à face au-dessus des fils lieurs. L'acquisition du diamètre de chaque bois (passant dans le faisceau) est obtenue à l'aide de la mesure d'interruption du faisceau laser (*figure 17*).

Il enregistre ainsi le diamètre et le nombre de sarments. Une valeur de biomasse est ensuite calculée sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \text{Biomasse} & \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right) \\
 & = \pi \times \text{Nombre de sarments} \left(\frac{1}{\text{m}^2} \right) \times \left(\frac{\text{Diamètre des sarments (mm)}}{2} \right)^2
 \end{aligned}$$

Les données ainsi enregistrées peuvent ensuite être exploitées sur un logiciel informatique de systèmes d'informations géographiques (SIG). Ici, l'exploitation des données est réalisée grâce au logiciel Qgis qui permet un travail de cartographie.

L'utilisation des données nécessite les étapes suivantes :

1. Récupération des données brutes sous format texte (.txt)

2. Utilisation du Plug-In « Physiocap » de Qgis qui permet de filtrer les données brutes en supprimant les données correspondant à des diamètres inférieurs à 4 millimètres (qui pourraient correspondre à des adventices) et supérieurs à 18 millimètres (qui correspondent aux piquets). Il transforme ensuite les données sous format shapefile (.shp), c'est-à-dire une couche de vecteurs, exploitable sous Qgis.

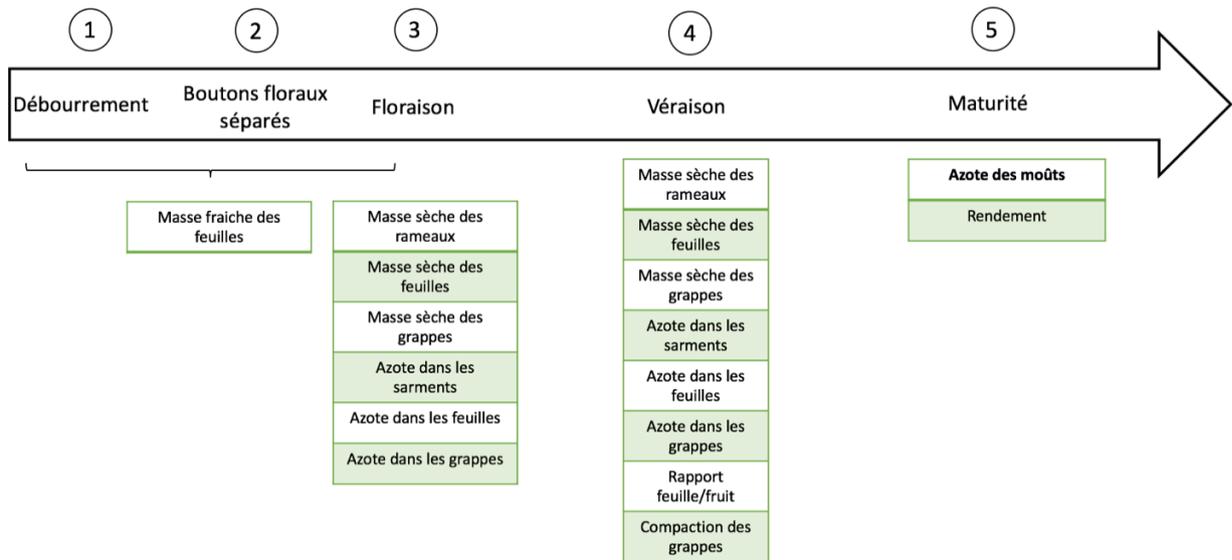


Figure 16 - Représentation des mesures physiologiques réalisées aux différents stades phénologiques

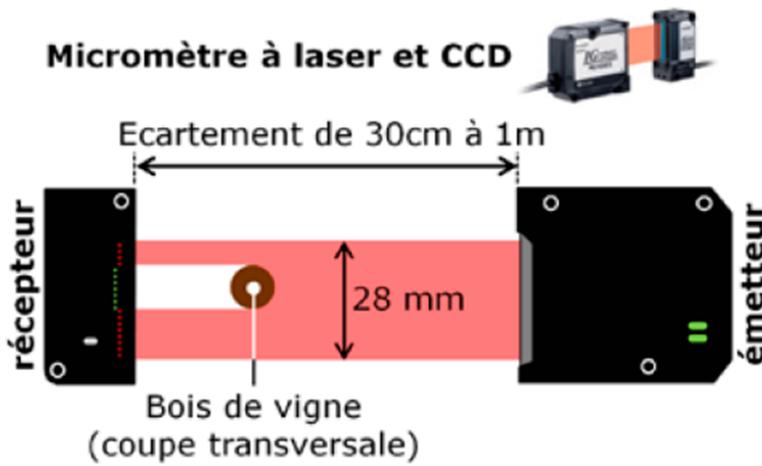


Figure 17 - Schéma de fonctionnement du micromètre laser du Physiocap (Le Vigneron Champenois, décembre 2014)

3. Cette couche de vecteurs est ensuite intersectée avec une autre couche de vecteurs correspondant à une couche de fond parcellaire. Cette dernière permet d'éliminer des données aberrantes qui n'auraient pas été enregistrées dans la parcelle.

On obtient ainsi une donnée géolocalisée correspondant à la biomasse via le diamètre et le nombre de sarments et à la vigueur via le diamètre du sarment.

b) Mesures à floraison et véraison

b.1) Stratégie d'échantillonnage

Les données obtenues pour ces différents stades phénologiques proviennent de données issues de sept rameaux primaires choisis aléatoirement, dans des zones définies, sur sept pieds différents en essayant de représenter la globalité spatiale d'un pied. Ce chiffre bien que faible a été choisi afin de limiter au maximum l'effet prélèvement sur les données en étant représentatif tout en restant réalisable sur le terrain pour l'ensemble des parcelles.

Les zones de prélèvements définies correspondent au même inter-piquet que les placettes visibles sur les *figure 14* et *15* et s'étirent sur les deux rangs adjacents de chaque côté de la placette (rang de la placette exclu).

b.2) Données liées à l'azote

Les données liées à l'azote dans les différents organes proviennent d'analyses réalisées par la C.A.M.A à partir de l'ensemble des prélèvements. Les données obtenues correspondent à une concentration. Afin de ne pas avoir de valeurs affectées par l'effet dilution de l'azote, ces dernières sont transformées en quantité à l'hectare (stock) à partir du calcul suivant :

$$\begin{aligned} & \text{Azote } \left(\frac{kg}{ha} \right) \\ & = \text{Teneur en azote } \left(\frac{g}{kg} \text{ de sec} \right) \times \text{Masse sèche moyenne par un rameau} \times \text{Nombre de rameaux par cep} \\ & * \text{Densité à l'hectare} \end{aligned}$$

b.3) Données liées au rapport de la production de masse sèche sur la biomasse de l'année n-1

Les données liées à la masse sèche des organes sont obtenues suite à un passage à l'étuve des échantillons frais des différents organes pendant une durée minimale de 72 heures à 70°C. Ces données sont également ramenées à l'hectare à partir du calcul suivant :

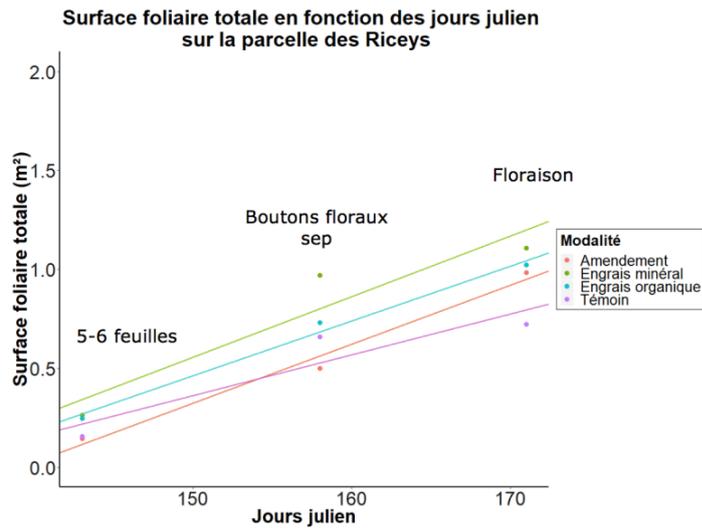
$$\begin{aligned} & \text{Masse sèche produite à l'hectare } \left(\frac{t}{ha} \right) \\ & = \text{Masse sèche moyenne par rameau} \times \text{Nombre de rameaux par pied} \times \text{Densité à l'hectare} \end{aligned}$$

Elles sont ensuite divisées par la biomasse mesurée au Physiocap afin d'obtenir le rapport masse sèche produite à floraison sur biomasse

b.4) Vitesse de croissance de la surface foliaire

La vitesse de croissance de la surface foliaire est obtenue grâce à des calculs de surface foliaire totale réalisés à trois stades phénologiques différents : 5-6 feuilles, boutons floraux séparés et floraison. A noter qu'avant le stade floraison, aucun rognage ou écimage n'avait été réalisé sur les parcelles du Réseau.

Les données de surface foliaire sont calculées à partir de la masse fraîche des feuilles des rameaux prélevés. Cette méthode se base sur une corrélation entre la surface foliaire totale



Modalité	Vitesse de croissance de la SFT	R ²
Amendement	0,028	0,97
Engrais minéral	0,030	0,79
Engrais organique	0,030	0,97
Témoin	0,021	0,73

Figure 18 - Représentation de la surface foliaire totale en fonction des jours julien et des vitesses de croissance de la surface foliaire totale associés

des feuilles d'un rameau et leur poids (limbe plus pétiole) (Demestihias & al, 2019). En multipliant la masse fraîche de feuille d'un rameau par le nombre de rameaux moyen par pied (obtenue à partir d'un comptage des bourgeons débouffés réalisé sur 9 séries de 10 pieds consécutifs) et en utilisant l'équation de transfert (Annexe II) on obtient la surface foliaire par cep. Globalement l'équation est la suivante :

$$\text{Surface foliaire totale moyenne par cep} = \frac{\text{Masse fraîche des feuilles de 7 rameaux}}{7} \times \text{Nombre de rameaux par pied} \times \text{Coefficient spécifique au cépage}$$

La vitesse de croissance de la surface foliaire est ensuite déterminée grâce à la pente de la régression linéaire de la surface foliaire totale en fonction des jours juliens. La *figure 18* présente cette méthode pour la parcelle des Riceys. L'utilisation de cette méthode pour la période comprise entre le stade 5-6 feuilles et floraison a été validée puisqu'aucun des R² pour les droites déterminées n'est inférieur à 0,71.

b.5) Données liées à la compaction des grappes

Les données liées à la compaction des grappes sont issues de la moyenne de l'ensemble des grappes présentes sur les sept rameaux primaires prélevés à véraison. La compaction a été déterminée à partir du rapport du poids des grappes sur leur longueur au carré (Tello et Ibáñez, 2014).

b.6) Mesure du rapport feuille/ fruit

Le rapport feuille/fruit est calculé au moment de la véraison à partir du rapport de la surface foliaire totale par cep (calculée comme explicité précédemment) sur le nombre de grappes par pied (obtenu à partir de trois comptages par modalité réalisés sur dix ceps consécutifs) multiplié par le poids moyen de grappe (obtenu grâce au « Réseau matu » du CIVC avant la vendange sur l'ensemble des cépages en fonction des régions).

c) Mesure des données à la vendange

c.1) Azote total des moûts

L'azote total des moûts est obtenu à partir des analyses du laboratoire du Service Vin du CIVC.

Chaque donnée est issue d'un échantillon de 100 baies. Elles sont prélevées sur l'ensemble de la modalité de façon à être de toutes tailles et de provenir autant du cœur de la grappe que de la face extérieure et intérieure au rang. Au maximum 5 baies sont issues d'un même pied mais jamais de la même grappe.

c.2) Mesure du rendement

Les données liées au rendement sont obtenues à partir des informations des référents de chaque parcelle qui ont distingué les modalités au sein de leur parcelle au moment de la vendange pour obtenir un rendement pour chacune d'elles.

III - 2) Données liées au sol

Les données physico-chimiques et granulométriques du sol sont acquises grâce à des bulletins d'analyse de terre contenant des données de : granulométrie, matière organique, C/N, indice

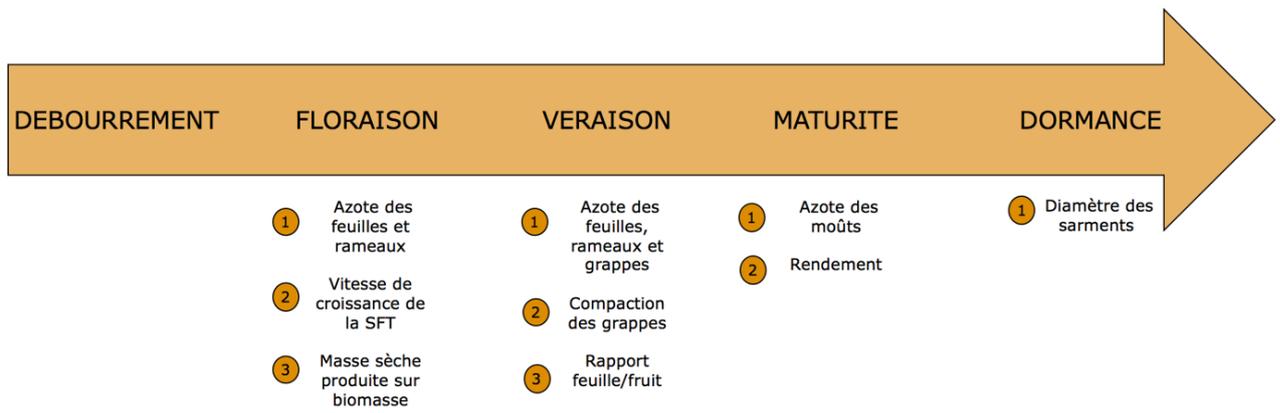


Figure 19 - Résumé des variables étudiées sur les différentes périodes

de pouvoir chlorosant, éléments majeurs et oligo-éléments. Ces analyses ont été réalisées par la Chaîne d'Analyses Marne – Ardennes (C.A.M.A).

a) Stratégie d'échantillonnage des données relatives aux modalités

Les données de sol relatives à une modalité sont obtenues à partir du mélange de trois échantillons correspondant chacun à un prélèvement réalisé à la tarière sur l'horizon 0-20 cm sur l'une des trois placettes données de la modalité.

b) Obtention des données

Les données de reliquats azotés sont obtenues à partir d'analyses réalisées par le laboratoire de la C.A.M.A.

Les données d'humidités pondérales sont obtenues à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Humidité pondérale du sol (\%)} = \frac{\text{Poids frais} - \text{Poids sec}}{\text{Poids frais}}$$

Le poids frais est acquis grâce à une pesée effectuée rapidement après le prélèvement. L'acquisition du poids sec est réalisée après un passage de l'échantillon de 72h minimum à l'étuve à 70°C.

IV) Méthode d'analyse des données

L'analyse des données a été réalisée grâce au logiciel R.

IV – 1) Impact des pratiques sur la physiologie de la vigne

a) Vérification de l'homogénéité des parcelles avant la mise en place des essais

Le but de la première analyse de données est de vérifier si les parcelles sont homogènes au niveau intraparcellaire sur les différentes zones spatiales choisies pour la mise en place des modalités.

Pour cela, une analyse de la moyenne du diamètre des sarments (mesurés par le Physiocap) en fonction des zones spatiales des futures modalités est effectuée. Les résidus de ces moyennes ne suivant pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été choisi pour cette analyse.

Dans le cas où une parcelle ne serait pas homogène avant la mise en place des modalités un facteur de correction sera calculé et appliqué sur les données physiologiques afin de tenir compte des variations initiales de vigueur au sein de la parcelle.

b) Analyse des données physiologiques

L'analyse est découpée en quatre périodes temporelles du cycle de la vigne. Une première, à floraison où la vigne s'est majoritairement développée de façon hétérotrophe grâce à ses réserves de l'année n-1. Une deuxième, à véraison lorsque la vigne est presque complètement autotrophe et se développe en grande partie grâce à l'exploitation des éléments du sol (pour ces deux premières périodes les données de 2018 et 2019 sont étudiées). Une troisième, à maturité technologique au moment des vendanges. Et la dernière, au cours de l'hiver qui suit la vendange (pour ces deux dernières périodes les données de 2018 seulement sont étudiées). Les données étudiées sur ces périodes sont résumées en *figure 19*.

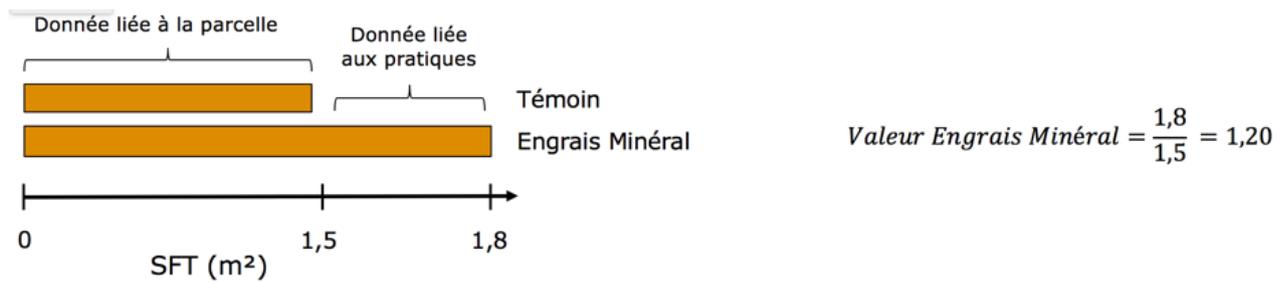


Figure 20 – Schématisation du procédé de calcul de la valeur d’une modalité par rapport au témoin ; Exemple du calcul de la valeur de SFT par rapport au témoin pour la modalité engrais minéral

- 1 Division de la valeur absolue de la modalité engrais minéral par la valeur absolue de la modalité témoin :

$$\frac{\text{Valeur absolue de la modalité engrais minéral}}{\text{Valeur absolue de la modalité témoin}} = \frac{41,9 \text{ kgN/ha}}{27,4 \text{ kgN/ha}} = 1,53$$

- 2 Application du facteur de correction de différence initiale de vigueur entre la modalité témoin et la modalité engrais minéral:

$$\text{Facteur de correction} * 1,53 = 0,955 * 1,53 = 1,46$$

➔ Valeur finale de la modalité engrais minéral : 1,46

Figure 21 - Exemple de la valeur appliquée à la modalité engrais minéral pour l'azote des feuilles et des rameaux pour la parcelle des Riceys en 2019 à floraison pour l'analyse des données interparcelles

Il est important de noter que les parcelles de Belval et de Festigny ont subi des dégâts de gel en 2019. Les dégâts ayant été homogènes sur les modalités de la parcelle de Belval, cette dernière sera quand même étudiée. A l'inverse, les dégâts sur la parcelle de Festigny ayant été hétérogènes en fonction des modalités, cette dernière ne rentrera donc pas en compte dans l'analyse des données 2019. Les dégâts de gel mesurés correspondant au comptage de bourgeons gelés réalisés sur trois séries de dix pieds consécutifs par modalités et sont disponibles en *Annexe III*.

Dans un premier temps, les données ont été analysées en valeur absolue (valeur mesurée) pour le témoin de chaque parcelle.

Puis afin de réaliser une étude de l'impact des pratiques de façon factorielle (en fonction des modalités) à l'échelle interparcellaire nous proposons une méthode basée sur l'utilisation d'un témoin pour chaque parcelle (essai fertilisation : témoin sans apport ; essai entretien du sol : témoin avec désherbage chimique en plein).

Pour cette méthode, la valeur de chaque donnée de la modalité étudiée est divisée par la valeur du témoin de la parcelle pour cette même donnée. La valeur ainsi étudiée pour une modalité correspond alors à un pourcentage par rapport à un témoin de la parcelle. La *figure 20* résume ce procédé avec un exemple.

Ensuite, pour comprendre l'impact du système sur les données physiologiques une étude des données rapportées au témoin est effectuée à l'échelle parcellaire pour déterminer des typologies de comportement en fonction des systèmes.

b.1) Etude des données physiologiques de la vigne lors de sa période hétérotrophe

Cette analyse a pour but de déterminer de façon indirecte par le développement de la vigne entre débourrement et floraison de l'année n s'il a existé une différence de mise en réserve au cours de l'année n-1 entre les modalités de fertilisation ou d'entretien du sol. Pour cela, les indicateurs suivants sont étudiés à floraison :

- Azote des feuilles et des rameaux (en stock)
- Vitesse de croissance de la surface foliaire
- Rapport entre la masse sèche produite à floraison et la biomasse de l'hiver n-1

Ces données sont donc étudiées dans un premier temps en valeur absolue (valeur mesurée) pour le témoin de chaque parcelle.

Dans un second temps chaque donnée de chaque modalité a été divisée par la donnée du témoin de la parcelle, comme explicité précédemment, avant d'être multiplié par le facteur de correction calculé pour les modalités significativement différentes de leur témoin au niveau de la vigueur avant la mise en place de l'essai. Ce processus est résumé sur la *figure 21* avec un exemple. Une ANOVA1 est ensuite appliquée sur ces données afin de déterminer s'il existe une différence significative sur le développement de la vigne entre débourrement et floraison entre les modalités à l'échelle interparcellaire.

Tableau 4 – Tableau résumant les différentes variables écophysologiques étudiées

Indicateur	Unité	Stade phénologique	Intérêt
Stock d'azote des feuilles et rameaux	$\frac{kgN}{ha}$	Floraison	Connaître le stock d'azote de la vigne suite à la phase de développement majoritairement hétérotrophe grâce aux réserves mises en place lors de l'année n-1
Masse sèche produite sur biomasse	$\frac{g}{mm^2/ml}$	Floraison	Connaître l'efficacité d'utilisation des réserves aériennes pour la production de masse sèche lors de la phase majoritairement hétérotrophe de la vigne
Vitesse de croissance de la surface foliaire	$\frac{m^2}{jour}$	Floraison	Connaître la vitesse de mise en place du feuillage avant tout travaux en vert
Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes	$\frac{kgN}{ha}$	Véraison	Connaître le stock d'azote de la vigne suite au pic d'absorption d'azote
Compaction des grappes	$\frac{g}{cm^2}$	Véraison	Déterminer s'il existe un impact des pratiques sur la compaction des grappes
Rapport feuille/fruit	$\frac{m^2}{kg}$	Véraison	Déterminer s'il existe un impact des pratiques sur le développement des feuilles par rapport aux fruits
Azote des moûts	$\frac{mg}{L}$	Maturité technologique	Connaître la nutrition azotée de la vigne
Rendement	$\frac{t}{ha}$	Maturité technologique	Connaître le rendement
Biomasse	$\frac{mm^2}{ml}$	Dormance	Connaître la biomasse aérienne de la vigne
Diamètre des sarments	mm	Dormance	Connaître la vigueur de la vigne

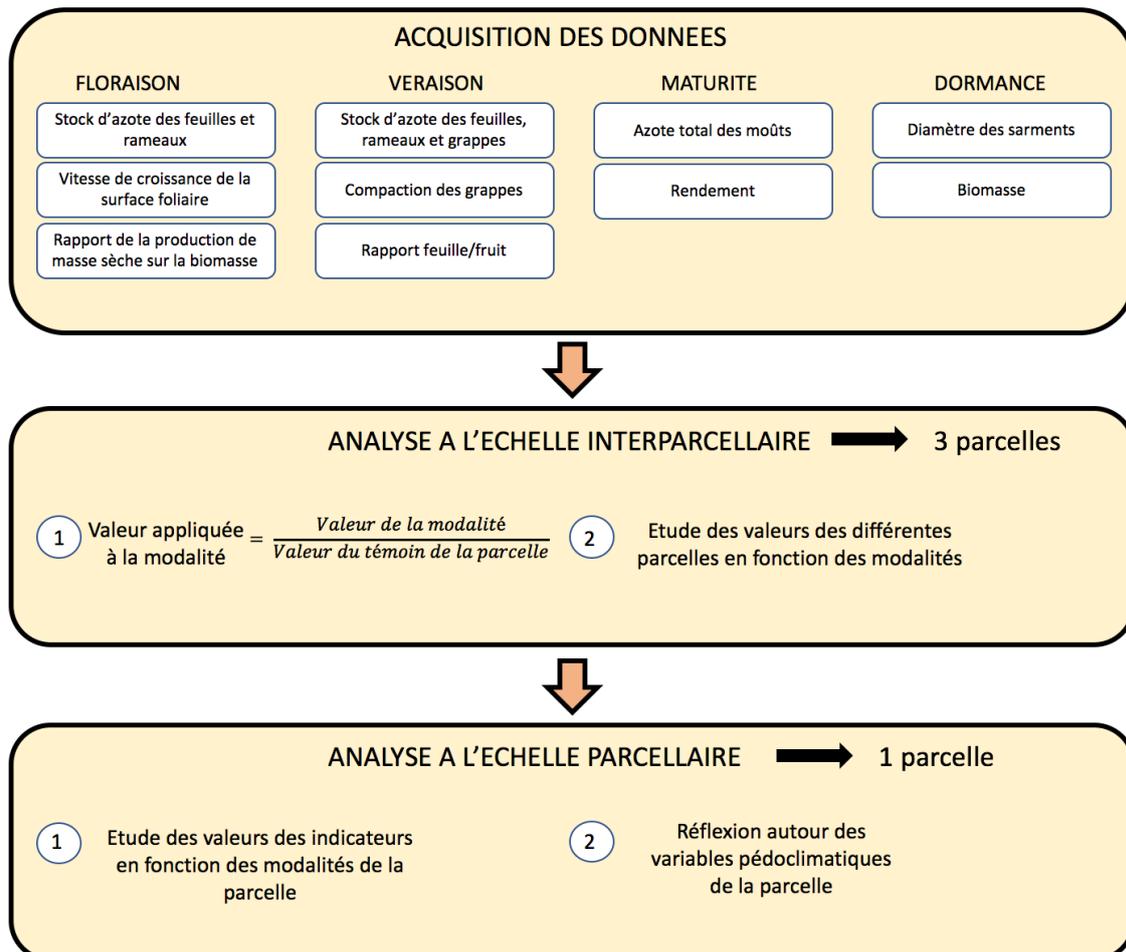


Figure 22 - Cheminement d'analyse des données écophysologiques du Réseau Vigueur

Ensuite, afin de réaliser une étude systémique des données, une analyse en fonction des modalités à l'échelle parcellaire est réalisée.

b.2) Etude des données physiologiques de la vigne lors de sa phase d'absorption d'azote

Cette analyse a pour but de déterminer si les modalités de fertilisation ou d'entretien du sol entraînent un développement différencié de la vigne en fonction des modalités suite à la phase d'absorption maximale d'azote de la vigne comprise entre floraison et véraison. Pour cela l'analyse a été faite sur les indicateurs suivants à véraison :

- Azote des feuilles, des rameaux et des grappes
- Compaction des grappes
- Rapport feuille/fruit

Comme à floraison les données sont étudiées dans un premier temps en valeur absolue pour le témoin de chaque parcelle.

Puis dans un second temps, une ANOVA1 est réalisée pour chaque indicateur en fonction des modalités de façon interparcellaire sur les données rapportées au témoin pour déterminer s'il existe un impact des modalités sur le développement de la vigne.

Une étude systémique est ensuite réalisée sur ces données à partir de l'étude des données à l'échelle parcellaire.

b.3) Analyse des données agronomiques à maturité

Cette analyse vise à déterminer s'il existe une différence entre les modalités sur les principaux attendus agronomiques de la vigne :

- Rendement
- Azote des moûts

Encore une fois, l'analyse réalisée sur les données suit le même cheminement qu'à floraison. Premièrement une étude des valeurs absolues des témoins de chaque modalité est réalisée. Un test ANOVA1 est ensuite effectué sur les données rapportées au témoin pour déterminer s'il existe un impact des modalités à l'échelle interparcellaire sur le rendement et l'azote des moûts. Ensuite une étude systémique est réalisée sur ces parcelles à l'échelle parcellaire.

b.4) Analyse de la vigueur à la fin de la campagne végétative

Cette analyse a pour but de déterminer s'il existe une différence d'évolution de la vigueur à la suite d'une année de mise en place des modalités. Pour cela, l'évolution du diamètre moyen des sarments entre l'hiver 2018 et 2017 sur chaque modalité de chaque parcelle est calculé. Un test ANOVA1 est alors réalisé pour comparer cette évolution en fonction des modalités afin de comprendre quelles modalités ont permis d'augmenter ou de stabiliser la vigueur suite à la première année d'étude.

L'ensemble des paramètres suivis sont résumés sur le *tableau 4*, le principe d'analyse est résumé en *figure 22*.

IV – 2) Impact des pratiques sur le sol

a) Impact des pratiques sur les reliquats azotés

Afin de déterminer l'impact des modalités de fertilisation et d'entretien du sol sur les reliquats azotés, une analyse des courbes des reliquats azotés en fonction du temps et des modalités pour chaque parcelle est réalisée.

b) Impact du travail du sol sur l'humidité du sol

Cette analyse est réalisée uniquement sur les parcelles avec des modalités d'entretien du sol.

Afin de comprendre si les pratiques d'entretien du sol ont un impact sur son humidité pondérale, une analyse des courbes de l'humidité pondérale du sol en fonction du temps et des modalités est réalisée pour chaque parcelle.

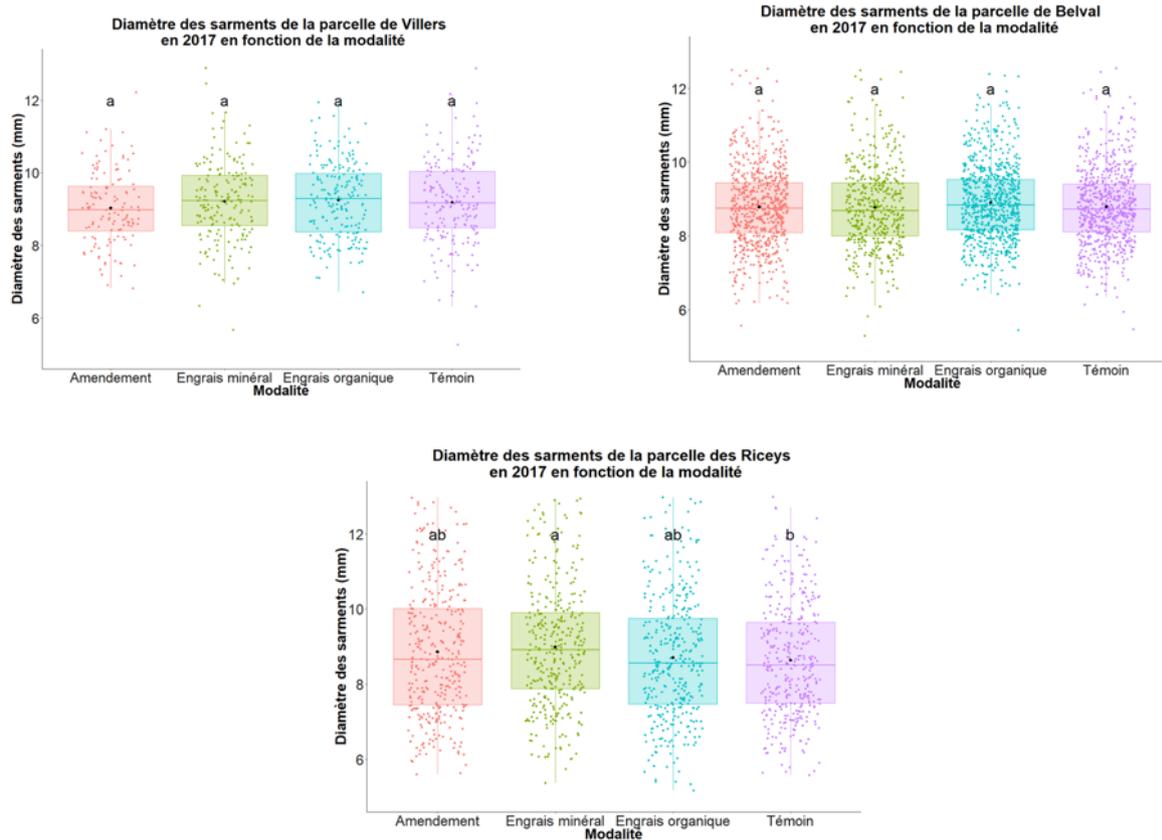


Figure 23 – ANOVA1 réalisée sur les diamètres moyens des sarments mesurés par le Physiocap[®] en fonction des zones spatiales choisies pour la mise en place des modalités des parcelles pour l’essai de fertilisation

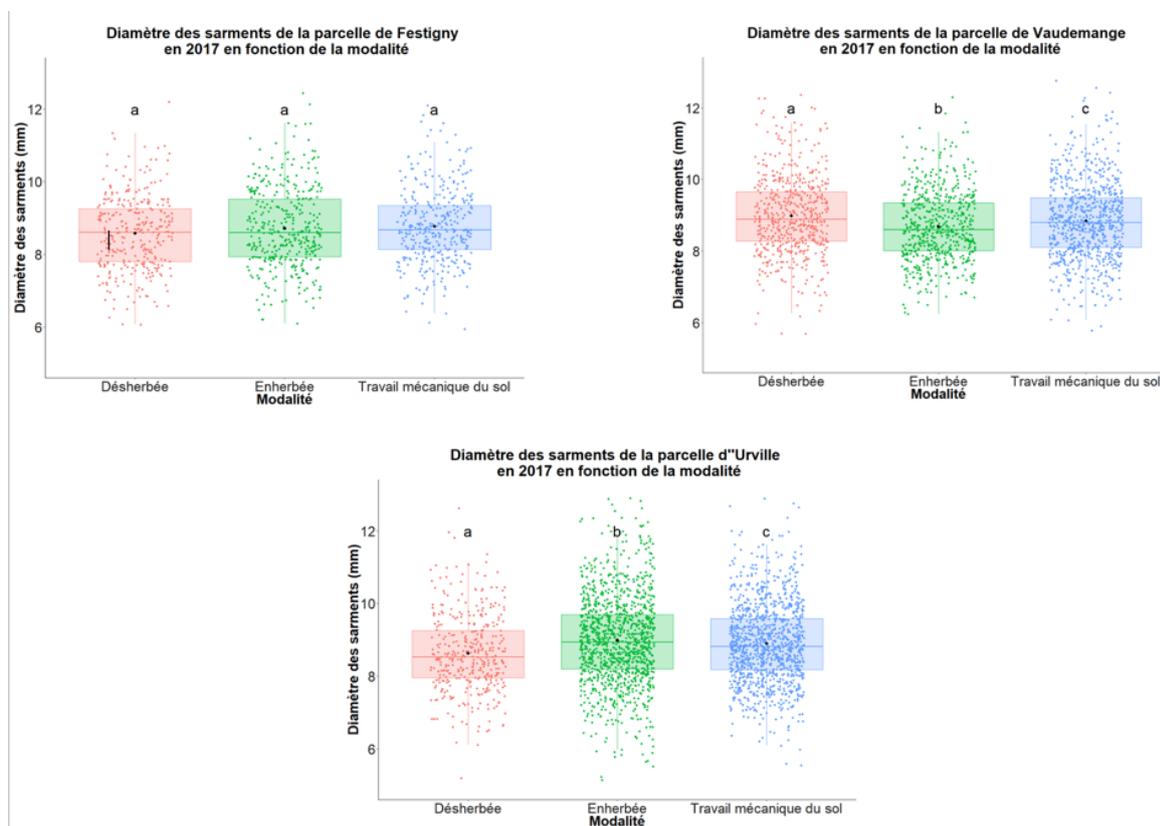


Figure 24 – ANOVA1 sur les diamètres moyens des sarments mesurés par le Physiocap[®] en fonction des zones spatiales choisies pour la mise en place des modalités des parcelles pour l’essai travail du sol

Partie 3 : Résultats et discussions

I) Mise en évidence de l'impact des pratiques sur la physiologie de la vigne

I-1) Vérification de l'homogénéité spatiale de la vigueur des parcelles avant la mise en place des modalités

A partir de la *figure 23*, on observe que pour l'essai fertilisation, les parcelles sont homogènes au niveau de la vigueur (diamètre des sarments) à l'exception de la parcelle des Riceys (résultats des tests disponibles en annexe IV).

Pour les parcelles de l'essai entretien du sol, seule la parcelle de Festigny est homogène d'après les tests statistiques (*figure 24*) avant la mise en place des modalités (résultats disponibles en annexe V).

Afin de prendre en compte ces variations initiales de vigueur et de s'en affranchir, un facteur de correction a été calculé pour l'ensemble des modalités avec des différences significatives. Etant donné que ces différences concernent toujours la modalité témoin, ce facteur de correction est calculé de la façon suivante :

Facteur de correction

$$= \frac{\text{Moyenne du diamètre des sarments de la modalité témoin}}{\text{Moyenne du diamètre des sarments de la modalité significativement différente au témoin}}$$

Il est appliqué à l'ensemble des données physiologiques en 2018 et 2019 des modalités qui sont significativement différentes du témoin de leur parcelle. Les facteurs de correction calculés sont résumés en *Annexe VI*.

I-2) Analyse des données écophysiologicals à floraison et véraison

a) Floraison

Etant donné qu'il n'y avait pas eu de différence de traitement sur les différentes zones spatiales des modalités en 2017, les réserves disponibles pour le développement de la vigne entre débourrement et floraison 2018 devraient être sensiblement homogènes sur l'ensemble des modalités. A l'inverse, 2018 ayant été la première année de mise en place des modalités, on suppose que la mise en réserve réalisée au cours de l'année 2018 est différenciée selon les modalités impliquant ainsi des potentiels de croissance différents en 2019.

L'hypothèse est donc la suivante : en 2018 les données physiologiques suivies devraient être homogènes au sein des différentes modalités alors qu'en 2019 des différences devraient se mettre en place.

a.1) Essai fertilisation

Pour rappel, suite à l'erreur de fertilisation sur la parcelle de Villers, les données ne sont pas étudiées à floraison 2019 sur cette parcelle.

Le *tableau 5* présente l'ensemble des valeurs absolues des différents indicateurs des modalités témoin de chaque parcelle en 2018 et 2019.

Tableau 5 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai fertilisation à floraison 2018 et 2019; Azote = Stock d'azote des feuilles et rameaux, MS/B = Masse sèche produite à floraison sur biomasse de l'année N-1, Vitesse de croissance de la SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale

	2018			2019		
	Azote (kgN/ha)	MS / B (g/(mm ² /ml))	Vitesse croissance de la SFT (m ² /jour)	Azote (kgN/ha)	MS / B (g/(mm ² /ml))	Vitesse croissance de la SFT (m ² /jour)
Villers	34,7	0,00345	0,053			
Riceys	40,4	0,00451	0,031	27,4	0,00261	0,042
Belval	33,5	0,00223	0,029	41,2	0,00294	0,024

Tableau 6 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à floraison et des tests ANOVA1 réalisés en 2018 sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités

	Azote des feuilles et rameaux par rapport au témoin		Vitesse de croissance de la surface foliaire par rapport au témoin		Masse sèche produite à floraison sur biomasse	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Engrais minéral	1,07 ± 0,06 a	1,34 ± 0,16	1,03 ± 0,09 a	1,33 ± 0,13	1,02 ± 0,05 a	1,39 ± 0,02
Engrais organique	1,19 ± 0,18 a	0,83 ± 0,07	1,10 ± 0,26 a	1,02 ± 0,45	1,08 ± 0,12 a	1,05 ± 0,08
Amendement	1,05 ± 0,09 a	1,00 ± 0,31	1,04 ± 0,14 a	1,26 ± 0,26	0,97 ± 0,18 a	0,97 ± 0,09

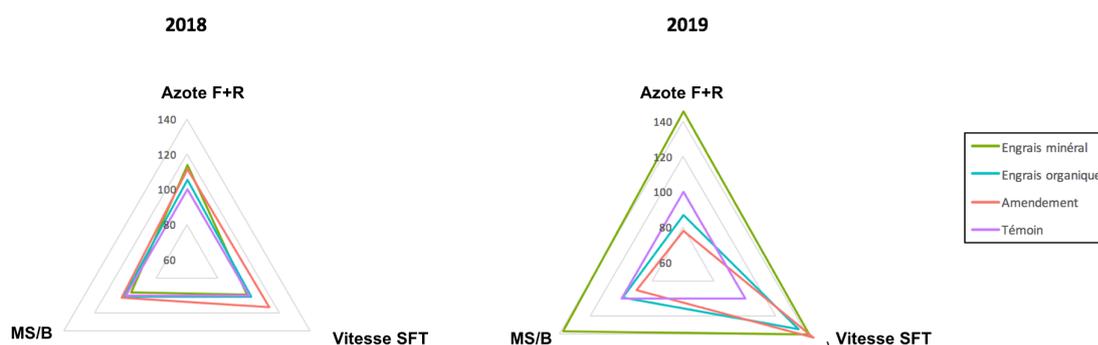


Figure 25 - Radar des variables par rapport au témoin à floraison pour la parcelle des Riceys en 2018 (gauche) et 2019 (droite) ; Azote F+R = Stock d'azote des feuilles et des rameaux ; MS / B = masse sèche produite sur biomasse ; Vitesse SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale

L'analyse statistique réalisée pour chaque indicateur en fonction des modalités en 2018 à partir d'une ANOVA1 ne montre pas de différences significatives entre les modalités pour l'ensemble des variables (*tableau 6*). Les résultats de ces tests sont disponibles en Annexe VII.

Bien qu'aucun test statistique n'ait été utilisé en 2019, une tendance claire se dégage. En effet, **en 2019 la modalité EM se distingue** nettement avec des valeurs de plus 30% supérieures au témoin pour les trois indicateurs, alors que les modalités EO et AM sont beaucoup plus proches de ce dernier comme le montre le *tableau 6*. Il semblerait donc que la **mise en réserve au cours de la campagne 2018 ait été plus importante sur la modalité EM**.

Cette différence de mise en réserve pourrait s'expliquer de deux façons. Premièrement par la **mise à disposition d'une quantité d'azote plus importante à dose équivalente d'azote pour un EM comparativement à un EO ou à un AM**. Cette explication semble logique puisqu'une partie de l'EO et de l'AM ne devrait pas être libérée immédiatement lors de l'apport mais stabilisée sous forme de matière organique stable. Deuxièmement par une **libération d'azote plus homogène et moins dépendante du sol et du climat pour un EM**. En effet, le résultat d'apport des EO et AM est très dépendant de leur vitesse de minéralisation, Or, cette dernière est fortement dépendante du type de sol (Abera and Endalkachew, 2012) et du climat (N'Dayegamiye, 2007) rendant leur action possiblement plus hétérogène en fonction des parcelles.

D'un point de vue systémique, la parcelle des Riceys est la parcelle qui présente les différences les plus extrêmes (*figure 25*). En 2019, la modalité EM se distingue très nettement des trois autres modalités qui sont plus homogènes. Ce comportement pourrait s'expliquer grâce aux variables pédoclimatiques de la parcelle. En effet, le potentiel de minéralisation de l'azote peut être réduit par de faibles quantités de matière organique (N'Dayegamiye, 2007) or le taux de matière organique est le plus faible des trois parcelles (*figure 26*) (avec une valeur de 2,3%) ce qui pourrait entraîner un effet plus limité de ces fertilisants sur ce type de parcelles. Un stock d'azote des vignes à la base plus faible sur la parcelle des Riceys pourrait également être à l'origine d'un effet plus important de l'apport d'EM comparativement aux EO et AM.

En résumé : En 2018, les différentes modalités étaient globalement homogènes sur les différents indicateurs écophysologiques suivis à floraison. En 2019, la modalité EM se distingue en tendance avec des indicateurs plus élevés que les autres modalités (en moyenne pour l'indicateur de stock azoté +61% et +31% par rapport respectivement à un EO et un AM et respectivement +32% et +43% pour la production de MS/B). Ceci pourrait s'expliquer par une mise en réserve plus importante en 2018 qui a permis un meilleur développement de la vigne lors de sa phase hétérotrophe jusqu'à floraison 2019. La différence de mise en réserve pourrait trouver son explication dans une mise à disposition d'azote plus importante à quantité équivalente d'azote apporté et/ou par l'homogénéité d'action plus grande d'un EM comparativement à des EO ou des AM dont la vitesse de minéralisation est dépendante des variables pédoclimatiques.

a.2) Essai entretien du sol

Le *tableau 7* présente les données en valeur absolue d'azote des feuilles et des rameaux, de vitesse de croissance et de masse sèche sur biomasse des différentes modalités témoin (désherbage chimique en plein) des parcelles.

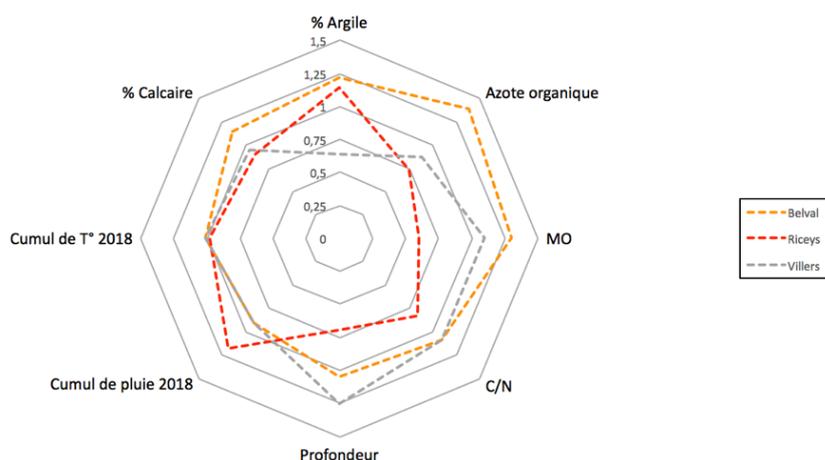


Figure 26 - Radar des variables pédoclimatiques de chaque parcelle par rapport à la moyenne des trois parcelles

Tableau 7 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai entretien du sol à floraison 2018 et 2019 ; Azote = Stock d'azote des feuilles et rameaux, MS/B = Masse sèche produite à floraison sur biomasse de l'année N-1 ; Vitesse SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale

	2018			2019		
	Azote (kgN/ha)	MS / B (g/(mm ² /ml))	Vitesse croissance de la SFT (m ² /jour)	Azote (kgN/ha)	MS / B (g/(mm ² /ml))	Vitesse croissance de la SFT (m ² /jour)
Vaudemange	44,8	0,0039	0,041	44,2	0,0049	0,037
Urville	37,8	0,0029	0,037	25,2	0,0021	0,032
Festigny	40,3	0,0026	0,044	58,5	0,0042	0,046

Tableau 8 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à floraison pour l'essai entretien du sol et des tests ANOVA1 réalisés en 2018 sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités

	Azote des feuilles et rameaux par rapport au témoin		Vitesse de croissance de la surface foliaire par rapport au témoin		Masse sèche produite à floraison sur biomasse	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Enherbé	1,12 ± 0,19 a	0,93 ± 0,24	1,11 ± 0,26 a	1,14 ± 0,10	1,01 ± 0,15 a	0,84 ± 0,22
Travail mécanique du sol	1,10 ± 0,08 a	1,18 ± 0,13	1,15 ± 0,18 a	1,10 ± 0,50	0,95 ± 0,13 a	1,06 ± 0,19

Les tests statistiques réalisés en fonction des modalités en 2018 (Annexe VIII) ne présentent pas de différences significatives entre les modalités (*tableau 8*). En 2019, les tests statistiques n'ont pas été réalisés car seules deux parcelles sont étudiées à cause des dégâts de gels hétérogènes sur la parcelle de Festigny. Au vu des valeurs des différents indicateurs et de leur écart-type (des valeurs comprises entre 0,9 et 1,15 pour un écart-type moyen de 0,20) il est **difficile de ressortir une tendance de l'impact de l'enherbement ou du travail du sol sur la mise en réserve de la vigne à la suite de la deuxième année de mise en place des modalités**. La bibliographie indique pourtant une légère diminution de la vigueur de la vigne la première année d'enherbement sur une parcelle (ITV France, 2002 ; Le Sueur et Panigai, 2005). Il serait donc intéressant de voir si cette tendance se confirme sur un plus long terme.

D'un point de vue systémique, on observe sur la *figure 27* que la parcelle de **Vaudemange est plus fortement impactée** en 2019 par l'enherbement que la parcelle d'Urville (stock d'azote de la vigne de -24% par rapport au témoin à Vaudemange contre +9% à Urville). Ce résultat pourrait s'expliquer de différentes façons. Premièrement la pousse de l'enherbement a été relativement faible à Urville en 2018 ce qui pourrait s'être traduit par une très faible compétition avec la vigne qui n'aurait donc pas eu d'impact sur la mise en réserve au cours de cette année-là contrairement à la parcelle de Vaudemange. Deuxièmement, la parcelle de Vaudemange possède **une biomasse plus faible** que la parcelle d'Urville (respectivement 429 mm²/ml et 506 mm²/ml) mais également une **densité de plantation plus importante** (9100 cep/ha à Vaudemange contre 7917 cep/ha à Urville). Ces différences **pourraient expliquer des conséquences plus importantes de la concurrence avec l'enherbement** pour cette parcelle.

En résumé : Les indicateurs suivis à floraison 2018 et 2019 n'ont pas permis de mettre en évidence un impact clair des modifications de pratiques d'entretien du sol. La bibliographie indique pourtant une légère diminution de la vigueur la première année d'enherbement de la parcelle qui aurait pu se répercuter sur les données à floraison 2019. Il sera donc intéressant de voir si une différence se met en place à véraison 2019.

b) Véraison

b.1) Essai fertilisation

Le *tableau 9* présente les données en valeur absolue d'azote total des feuilles, rameaux et grappes, compaction des grappes et rapport feuille sur fruit et des différentes modalités témoin des parcelles. On remarque pour la parcelle de Belval, qui a été gelée en début de printemps 2019 que le rapport feuille sur fruit est beaucoup plus élevé que les autres parcelles avec une valeur de 9,6 m²/kg. Ceci s'explique par un développement important des entre-cœurs non fructifères qui ont entraîné un développement de la surface foliaire sans production de fruits.

L'analyse statistique à partir d'une ANOVA1 des indicateurs en fonction des modalités ne montre aucune différence significative entre les modalités pour l'ensemble des indicateurs suivis en 2018 et 2019 (*tableau 10*). Les résultats sont disponibles en *Annexe IX*.

On remarque qu'en tendance **l'indicateur de stock azoté de la vigne est le plus élevé sur la modalité EM en 2018 et 2019** (+27% en 2018 et +45% en 2019 par rapport au témoin). Une libération d'azote plus importante d'un EM comparativement à un EO ou un AM à même

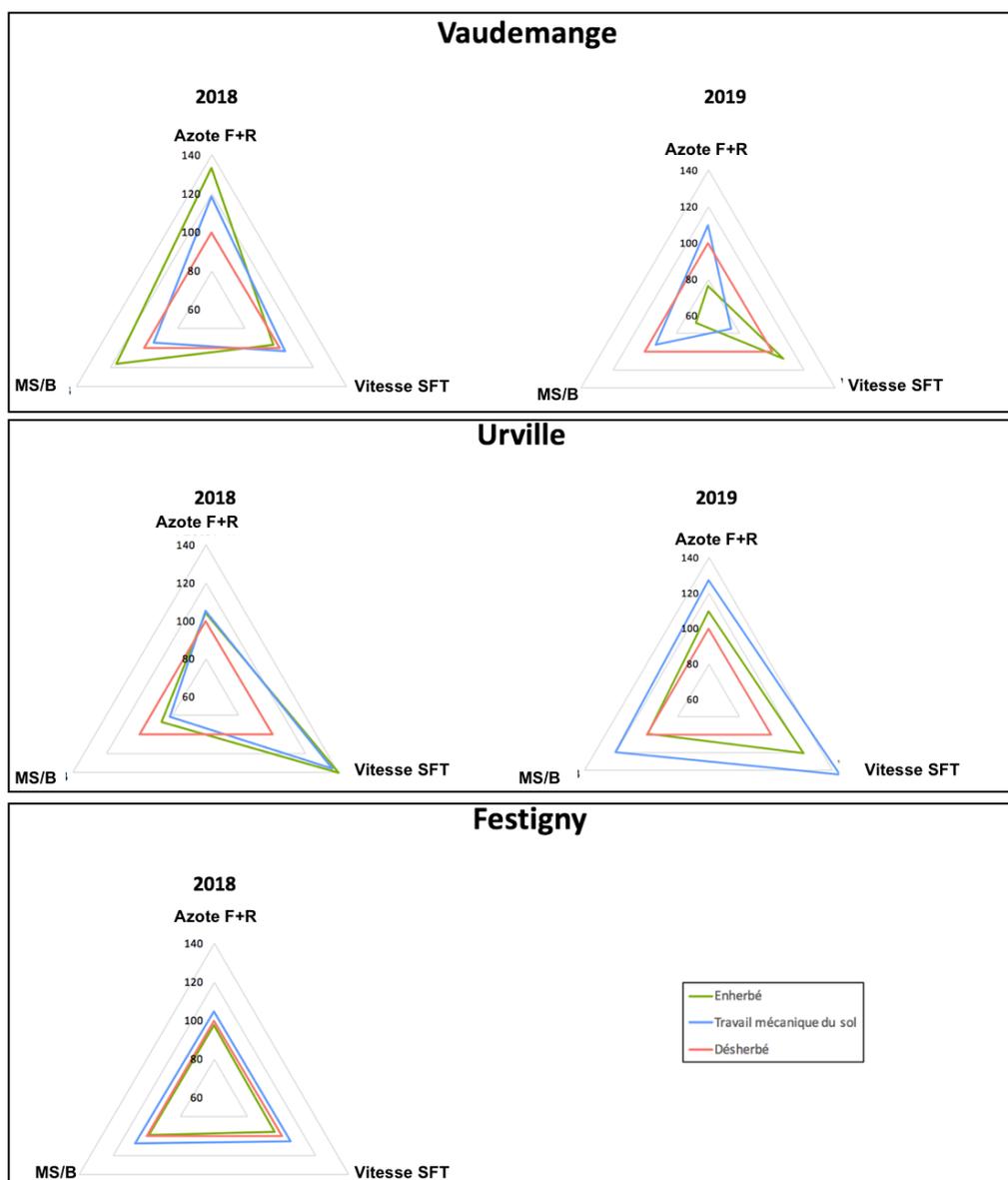


Figure 27 - Radar des variables par rapport au témoin à floraison pour les différentes parcelles de l'essai entretien du sol en 2018 (haut) et 2019 (bas) ; Azote F+R = Stock d'azote des feuilles et des rameaux ; MS / B = masse sèche produite sur biomasse ; Vitesse SFT = Vitesse de croissance de la surface foliaire totale

Tableau 9 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai fertilisation à véraison 2018 et 2019; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes

	2018			2019		
	Azote F+R+G (kgN/ha)	Compaction des grappes (g/cm ²)	Rapport feuille/fruit (m ² /kg)	Azote F+R+G (kgN/ha)	Compaction des grappes (g/cm ²)	Rapport feuille/fruit (m ² /kg)
Villers	44,0	0,7	0,7	64,3	1,1	1,4
Riceys	58,0	0,6	1,0	37,0	0,8	1,9
Belval	60,5	0,9	1,0	78,2	1,0	9,6

dose d'azote apporté ou une homogénéité d'action plus importante pourrait encore une fois expliquer ce résultat. **Les données d'EO et d'AM bien qu'également supérieures au témoin en 2018 et 2019 ne montrent pas de tendance aussi forte que la modalité EM.** Ces résultats restent cependant à relativiser au vu de l'importance des écarts-type (0,31 en moyenne pour des valeurs comprises entre 1,05 et 1,45). Il sera donc intéressant d'analyser l'azote des moûts en fonction des modalités pour confirmer ou infirmer ces tendances à partir de l'état de nutrition azotée des vignes sur les différentes modalités.

D'un point de vue systémique, pour la parcelle des Riceys, on observe que l'indicateur azoté est supérieur au témoin pour les modalités EO (+56%) et AM (+34%) en 2019 (*figure 28*). Il semblerait donc que l'apport de ces fertilisants ait permis d'obtenir un stock d'azote à véraison plus important que pour un témoin non fertilisé. La température ayant été en moyenne relativement la même que pour les autres parcelles et la pluviométrie ayant été plus faible (214 mm entre débourrement floraison contre 250 mm). **L'action plus importantes des fertilisants pourrait donc s'expliquer par un stock d'azote en valeur absolue plus faible que les autres parcelles.** Il sera donc également intéressant de suivre l'azote des moûts pour confirmer ces résultats à l'échelle des parcelles.

En résumé : En 2018 et 2019, les données écophysiologicals étudiées à véraison permettent de montrer en tendance, un stock d'azote de la vigne plus important pour la modalité EM comparativement aux EO et AM (respectivement +26% et +38%). Ce résultat est cohérent avec l'analyse des données à floraison 2019 qui semblent indiquer une mise en réserve plus importante pour la modalité EM au cours de l'année 2018. Il sera donc intéressant d'analyser l'azote total des moûts pour vérifier si cette tendance se retrouve également sur la nutrition azotée des vignes. Les différents types de fertilisation ne semblent pas avoir impacté les données de compaction et de rapport feuille sur fruit.

b.2) Essai entretien du sol

La *tableau 11* présente les données en valeur absolue d'azote total des feuilles, rameaux et grappes, compaction des grappes et rapport feuille sur fruit et des différentes modalités témoin des parcelles.

D'un point de vue statistique, les ANOVA1 réalisées pour chaque indicateur en fonction des modalités ne montrent aucune différence significative entre les modalités en 2018 (*tableau 12*). Les résultats des tests sont disponibles en annexe X. En 2019, l'indicateur azoté est en tendance plus élevé pour la modalité enherbé que pour le témoin (+29%). Ce résultat ne semble pas en accord avec les données étudiées à véraison 2018 (-8%) et floraison 2019 (-7%). Il sera donc intéressant de suivre l'azote total des moûts à la vendange 2019 pour voir si cette tendance se confirme sur la nutrition azotée de la vigne. On observe également que le rapport feuille sur fruit est plus élevé pour les modalités enherbé et travail mécanique du sol par rapport au témoin. Cependant les écarts-type sont importants et il semble compliqué de faire ressortir une tendance nette de ces résultats.

D'un point de vue systémique, les résultats observés à floraison 2019 qui indiquaient un impact plus important de l'enherbement sur la parcelle de Vaudemange vis à vis des autres

Tableau 10 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à véraison et des tests ANOVA1 réalisés sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités et des années pour l'essai fertilisation

	Azote des feuilles, rameaux et grappes par rapport au témoin		Compaction des grappes par rapport au témoin		Rapport feuille sur fruit par rapport au témoin	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Engrais minéral	1,27 ± 0,34 a	1,45 ± 0,44 a	0,95 ± 0,12 a	0,98 ± 0,06 a	1,21 ± 0,25 a	0,98 ± 0,49 a
Engrais organique	1,07 ± 0,27 a	1,15 ± 0,35 a	0,95 ± 0,12 a	0,97 ± 0,22 a	1,16 ± 0,12 a	0,90 ± 0,19 a
Amendement	1,14 ± 0,22 a	1,05 ± 0,27 a	0,97 ± 0,11 a	1,07 ± 0,17 a	1,06 ± 0,27 a	0,94 ± 0,33 a

Riceys

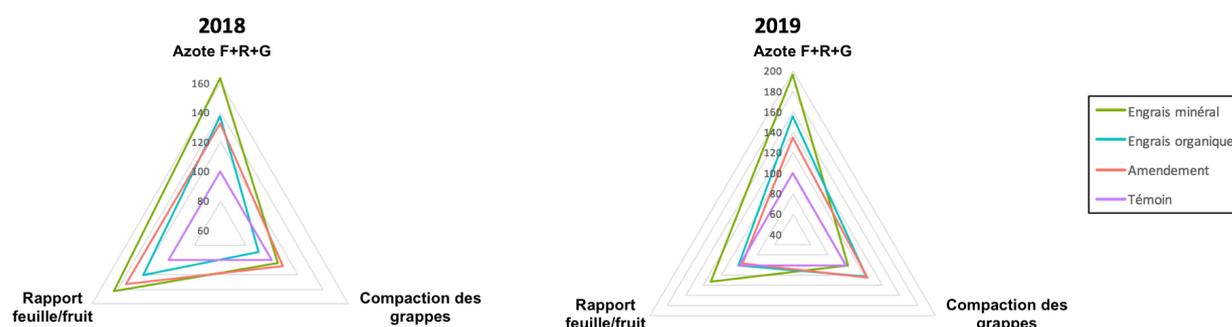


Figure 28 - Radar des variables par rapport au témoin à véraison pour la parcelles des Riceys en 2018 (gauche) et 2019 (droite) ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes

Tableau 11 - Valeurs des différentes variables des témoins de chaque parcelle de l'essai travail du sol à véraison 2018 et 2019 ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes

	2018			2019		
	Azote F+R+G (kgN/ha)	Compaction des grappes (g/cm ²)	Rapport feuille/fruit (m ² /kg)	Azote F+R+G (kgN/ha)	Compaction des grappes (g/cm ²)	Rapport feuille/fruit (m ² /kg)
Vaudemange	89,5	0,8	1,0	59,8	0,8	2,1
Urville	86,9	0,7	0,8	50,2	1,0	1,3
Festigny	101,1	0,7	1,2	74,8	1,0	3,8

parcelles ne se confirment pas à véraison. En effet, pour cette parcelle, l'indicateur azoté est 48% supérieur au témoin à véraison pour la modalité enherbé (*figure 29*). Ce résultat paraît donc étonnant et pourrait être lié à un échantillonnage non représentatif. Il sera intéressant d'analyser l'azote total du moût de cette parcelle pour confirmer ou infirmer des tendances à partir de la nutrition azotée de la vigne sur les différentes modalités.

En résumé : Les données étudiées à véraison en 2018 et 2019 n'ont pas permis de dégager de tendance nette en fonction des modalités. Il ne semble pas exister d'impact du changement des pratiques d'entretien du sol à la suite des deux premières années de mise en place des modalités, ce qui semble confirmer le résultat des données étudiées à floraison. Il sera intéressant d'analyser l'azote total des moûts et le rendement en 2018 et 2019 pour vérifier que cette tendance se confirme à partir de l'état de nutrition azotée de la vigne.

Globalement, l'ensemble des données étudiées à floraison et véraison pour l'essai fertilisation et l'essai entretien du sol n'ont pas permis de mettre en évidence de différences statistiques entre les modalités mais certaines tendances sont ressorties malgré des écarts-type important. Il pourrait être intéressant pour la suite de l'étude de mettre en place des répétitions sur les variables mesurées afin dans un premier temps de vérifier l'homogénéité des prélèvements réalisés au sein d'une même modalité et dans un second temps d'augmenter la puissance des tests statistiques.

I-3) Analyse des données à la vendange

Pour rappel ces données concernent uniquement la campagne 2018.

a) Essai fertilisation

En raison d'une mésentente lors des vendanges, les résultats d'azote des moûts et de rendement n'ont pas été recueillis au moment de la vendange en 2018 pour la parcelle de Villers. Les résultats seront donc uniquement étudiés pour les parcelles de Belval et des Riceys.

a.1) Azote total des moûts

Sur la *figure 30*, il ressort nettement que les taux d'azote des moûts sur les modalités EM sont nettement supérieurs au témoin pour les parcelles de Belval et des Riceys (respectivement +176,6% et +94,4%) alors que ceux de la modalité amendement sont relativement similaires au témoin (-3% et +0%). Cette observation n'est pas aussi tranchée sur les modalités EO qui diffèrent selon les parcelles. En effet sur la parcelle de Belval, la modalité EO présente des taux d'azote total du moût beaucoup plus élevés par rapport au témoin (+111%) alors que ces taux approximent le témoin pour la parcelle des Riceys (+15%). D'autant que cette différence ne semble pas impactée par la valeur absolue de l'azote total des moûts (71,3 mg/L à Belval contre 62 mg/L au Riceys).

L'azote total est un outil particulièrement performant pour le diagnostic de l'alimentation azotée de la vigne (van Leeuwen et al, 2000). Les résultats précédents semblent donc indiquer la **capacité des EM à favoriser une alimentation azotée de la vigne plus élevée qu'un EO ou un AM à dose équivalente d'azote apporté. Les AM ne semblent pas du tout impacter la nutrition azotée de la vigne alors que l'impact des E.O paraît être beaucoup plus hétérogène en fonction des types de sol.** Le faible effet de l'EO sur la nutrition azotée sur la parcelle des Riceys pourrait être lié à une quantité de MO nettement plus faible que sur la

Tableau 12 - Résultats des variables par rapport au témoin en fonction des modalités à véraison et des tests ANOVA1 réalisés sur chaque indicateur séparément les uns des autres en fonction des modalités et des années pour l'essai entretien du sol

	Azote des feuilles, rameaux et grappes par rapport au témoin		Compaction des grappes par rapport au témoin		Rapport feuille sur fruit par rapport au témoin	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Enherbé	0,92 ± 0,10 a	1,29 ± 0,27	1,21 ± 0,18 a	1,11 ± 0,09	1,03 ± 0,34 a	1,49 ± 0,24
Travail mécanique	1,00 ± 0,06 a	1,08 ± 0,02	1,08 ± 0,10 a	1,10 ± 0,15	1,01 ± 0,14 a	1,23 ± 0,38

Vaudemange

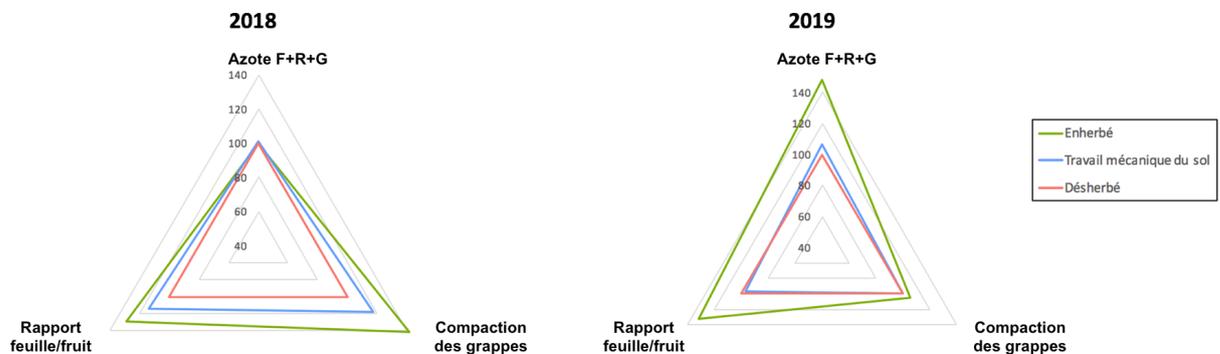


Figure 29 - Radar des variables par rapport au témoin à véraison pour la parcelle de Vaudemange en 2018 (gauche) et 2019 (droite) ; Azote F+R+G = Stock d'azote des feuilles, rameaux et grappes

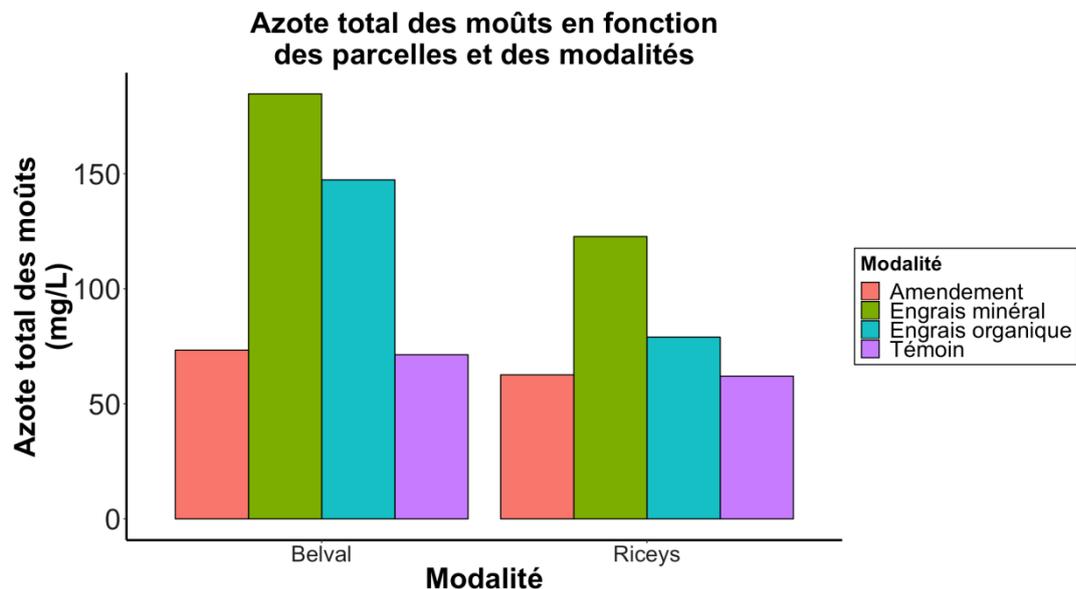


Figure 30 - Azote total des moûts des parcelles de Belval et des Riceys en 2018

parcelle de Belval et donc un potentiel de minéralisation inférieure sur cette parcelle. Ceci semble cohérent avec l'analyse des données réalisées précédemment. En effet, les données étudiées à véraison 2018 et floraison 2019 semblaient indiquer la mise en place d'un stock d'azote plus important dans la plante pour la modalité EM vis à vis des autres modalités. Il sera intéressant de vérifier si cette tendance se confirme en 2019 avec un azote total du moût également plus important pour la modalité engrais minéral.

a.2) Rendement

La *figure 31* présente les faibles écarts de rendement par rapport au témoin en fonction des modalités (0,67 t/ha en moyenne pour des rendements compris entre 16,1 et 23,3 t/ha) sur les parcelles de Belval et des Riceys. Au vu des résultats plutôt hétérogènes, il semblerait qu'il n'existe pas d'impact des pratiques de fertilisation sur le rendement dès la première année de mise en place des modalités. Il sera intéressant d'observer si cette tendance se modifie en 2019.

En résumé : Le suivi de l'azote total du moût qui est un bon indicateur de la nutrition azotée de la vigne montre en tendance une meilleure nutrition de la vigne en 2018 pour la modalité EM vis à vis des EO ou AM. Ce résultat est cohérent avec les indicateurs physiologiques suivi à véraison 2018 et floraison 2019 qui font également ressortir la modalité EM. A dose équivalente un EM semble donc permettre une meilleure nutrition azotée de la vigne qu'un EO ou un AM. L'apport d'AM ne semble pas impacter la nutrition azotée de la vigne alors que celui d'EO semble plus hétérogène, probablement du fait de l'impact des caractéristiques du sol sur ce dernier.

Les modalités ne semblent cependant pas impacter le rendement.

Il sera intéressant d'étudier ces mêmes données en 2019 mais aussi au cours des années suivantes pour voir comment ces tendances évoluent.

b) Essai entretien du sol

b.1) Azote total des moûts

L'analyse statistique (ANOVA1) en fonction des modalités de l'azote total des moûts par rapport au témoin désherbé chimiquement en 2018 ne présente **pas de différences significatives entre les modalités travail mécanique du sol et enherbé après la première année d'expérimentation**. Les résultats sont présentés dans le *tableau 13 (annexe XI)*.

D'un point de vue systémique, aucune tendance forte ne se dessine sur l'ensemble des trois parcelles (*figure 32*).

On pourra cependant noter pour la parcelle de Vaudemange, qui montrait des résultats contradictoires, une diminution de 29% de l'azote total des moûts visible pour la modalité enherbé comparativement à la modalité témoin. Ce résultat va dans le sens des résultats observés à véraison 2018 et floraison 2019 et semble indiquer une diminution de la nutrition azotée sur la modalité enherbé.

b.2) Rendement

D'un point de vue statistique, le test d'ANOVA1 ne montre pas de différences significatives entre les modalités d'entretien du sol pour le rendement (*annexe XII*). De plus, il semble difficile de faire ressortir une tendance de ces résultats au vu des résultats du *tableau 14*.

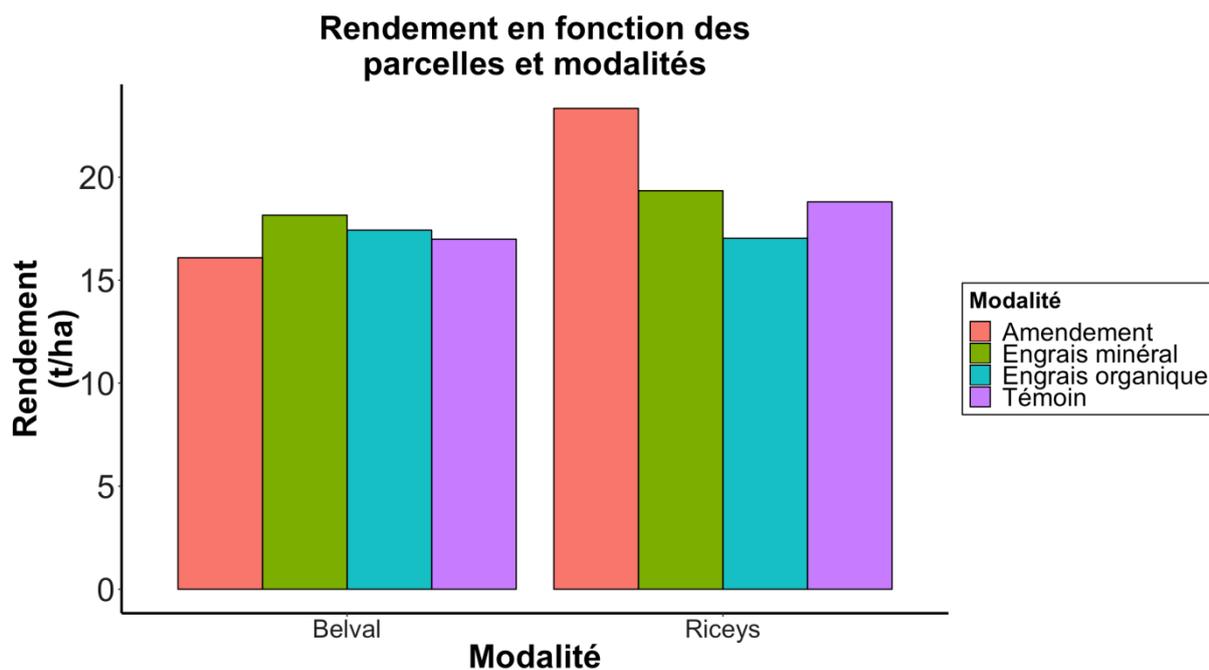


Figure 31 - Rendements des parcelles de Belval et des Riceys en fonction des modalités en 2018

Tableau 13 – Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur l'azote total des moûts par rapport au témoin de l'essai entretien du sol en 2018

Modalité	Azote total des moûts par rapport au témoin
Enherbé	0,90 ± 0,23 a
Travail mécanique du sol	0,74 ± 0,12 a

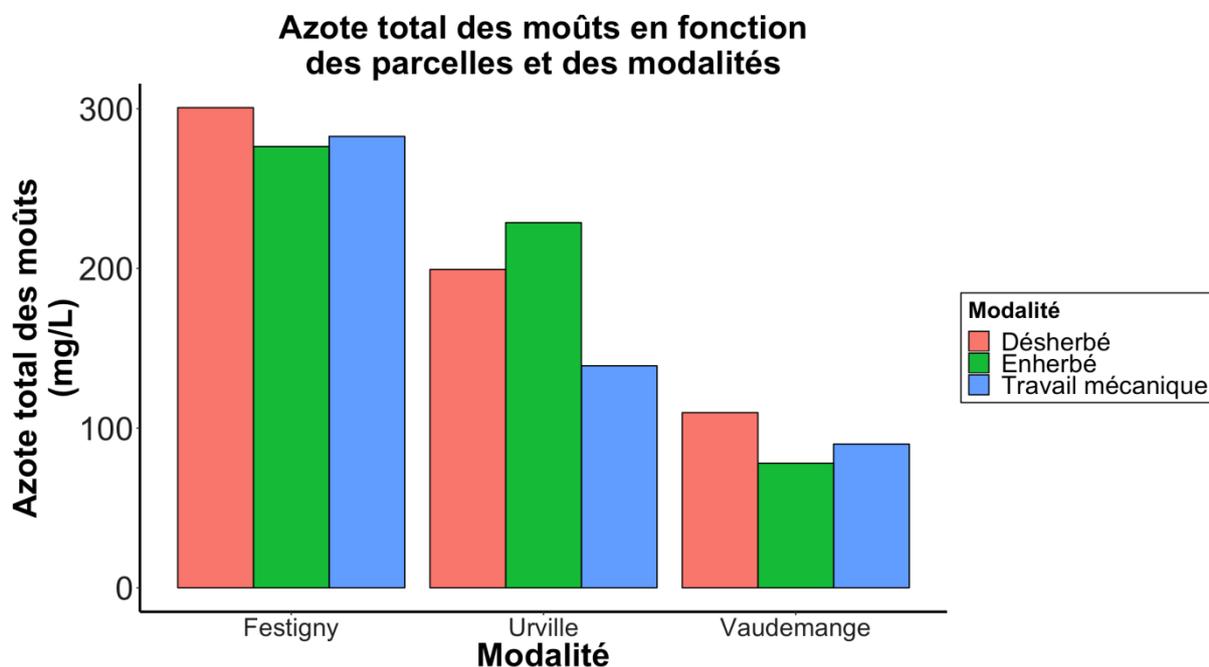


Figure 32 - Azote total des moûts en fonction des parcelles et des modalités de l'essai entretien du sol en 2018

D'un point de vue systémique l'impact des modalités sur le rendement est très hétérogène en fonction des parcelles (*figure 33*), et ne présente pas de tendance commune. Il semblerait donc qu'il n'existe pas d'impact de la modalité d'entretien du sol sur le rendement à la suite de leur première année de mise en place.

En résumé : Les données étudiées d'azote des moûts et du rendement ne permettent pas de mettre en évidence un impact clair du changement des pratiques d'entretien du sol sur la nutrition azotée de la vigne et son rendement dès la première année de changement de pratique. Ce résultat semble confirmer les tendances des données étudiées à véraison 2018 et floraison 2019.

Il sera intéressant d'étudier ces données à la vendange 2019 pour voir si cette tendance se confirme.

Globalement, l'étude des données à la vendange 2018 a permis de mettre en évidence certaines tendances entre les modalités de l'essai fertilisation contrairement à l'essai entretien du sol. Afin de renforcer la pertinence de l'analyse de ces données, des répétitions seront mises en place en 2019 au sein de chaque modalité. Elles permettront de réaliser des tests statistiques entre les modalités à l'échelle parcellaire.

I-4) Analyse des données à la dormance

a) Essai fertilisation

Un test ANOVA est réalisé sur les données d'évolution du diamètre moyen des sarments en fonction des modalités entre 2018 et 2017, les données utilisées pour ce test sont visibles en *annexe XII*. Les résultats du test d'ANOVA1 réalisé sur ces données sont résumés dans le *tableau 15* et les résultats sont disponibles en *annexe XIV*.

Bien qu'aucune différence significative ne soit visible, on remarque en tendance que la diminution du diamètre des sarments a été plus faible sur la modalité EM par rapport aux modalités EO, AM ou témoin. **Au vu des résultats précédents, cette moindre diminution de la vigueur pourrait être liée à une meilleure nutrition azotée de la vigne.** De plus au vu des écarts-type l'évolution de la vigueur a été plus stable sur la modalité EM en fonction des parcelles. Encore une fois ce résultat pourrait s'expliquer par un effet plus homogène de l'apport d'un EM contrairement à des EO ou des AM qui sont beaucoup plus dépendants du climat et du type de sol sur lequel ils sont apportés.

Un test de Kruskal-Wallis est ensuite réalisé pour déterminer s'il existe une différenciation à l'échelle parcellaire du diamètre des sarments entre les modalités à la suite de la première année d'expérimentation pour les parcelles qui étaient homogènes en 2017 (Villers et Belval). Les résultats sont résumés en *figure 34* (les résultats du test statistique sont disponibles en Annexe XV).

On observe que les résultats sont les mêmes pour la modalité EM qui se distingue positivement de son témoin pour les parcelles de Villers et de Belval. Les résultats sont plus hétérogènes pour la modalité EO et AM. La modalité EO se distingue positivement de son témoin pour la parcelle de Belval alors que ce n'est pas le cas pour la parcelle de Villers. Ce résultat pourrait s'expliquer de deux façons, premièrement par **les dates d'apport des engrais** sur la parcelle et deuxièmement par la **pluviométrie qui a suivi l'apport**. Alors que sur la

Tableau 14 – Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur le rendement par rapport au témoin en fonction des modalités des parcelles de l'essai entretien du sol en 2018

Modalité	Rendement par rapport au témoin
Enherbé	0,97 ± 0,08 a
Travail mécanique du sol	0,90 ± 0,07 a

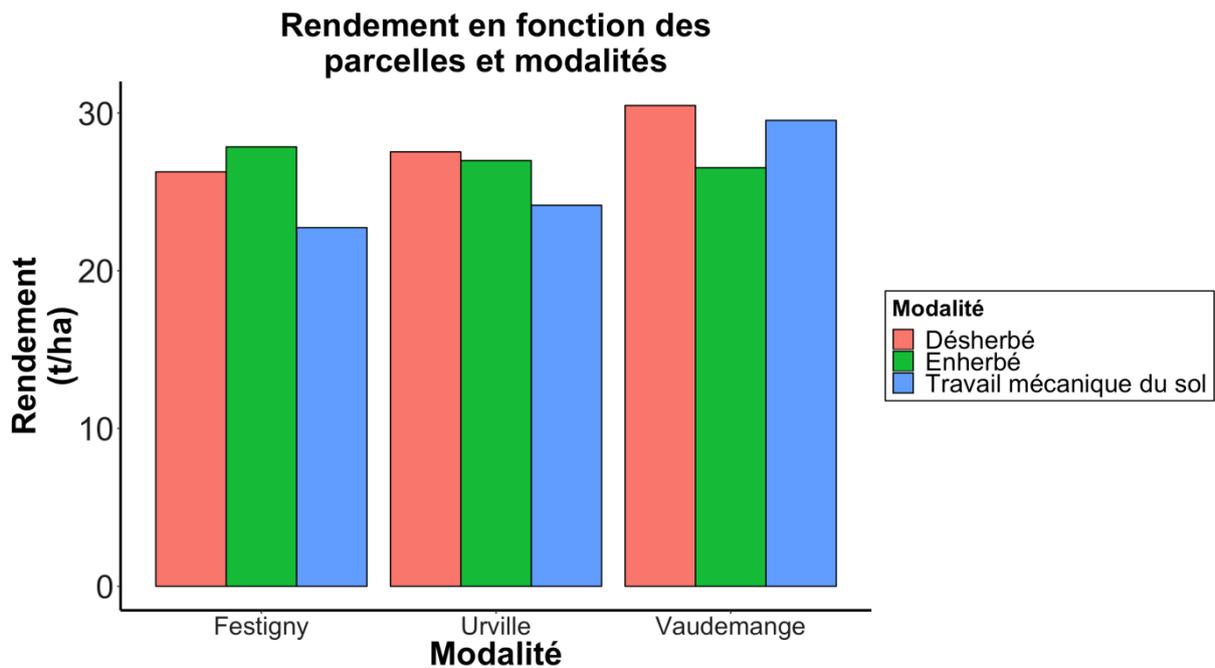


Figure 33 - Rendements des parcelles de l'essai entretien du sol en fonction des parcelles et des modalités en 2018

Tableau 15 – Résultats de l'ANOVA1 réalisée sur l'évolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017 des parcelles de l'essai fertilisation en fonction des modalités

Modalité	Evolution du diamètre des sarments entre 2018 et 2017 (diamètre moyen 2018 / diamètre moyen 2017)
Engrais minéral	0,96 ± 0,04 a
Engrais organique	0,92 ± 0,08 a
Amendement	0,93 ± 0,07 a
Témoin	0,92 ± 0,10 a

parcelle de Belval (où la modalité E.O se distingue positivement du témoin) l'apport a été réalisé le 26 février 2018 et la pluviométrie qui a suivi cet apport durant les 30 jours suivant a été de 58,3 mm, il a été réalisé le 6 avril 2018 avec une pluviométrie qui a suivi de seulement 39,1 mm à Villers. Ainsi, on pourrait faire l'hypothèse que la dégradation et la mise à disposition des éléments minéraux n'a pas eu le temps de se faire pour la parcelle de Villers alors que cela a été le cas sur la parcelle de Belval. De plus, la plus faible pluviométrie sur la parcelle de Villers a pu défavoriser le processus de dégradation de l'E.O.

A l'inverse, la modalité amendement se distingue positivement de son témoin pour la parcelle de Villers alors que ce n'est pas le cas pour la parcelle de Belval. Ce résultat pourrait s'expliquer par un ISMO (615 kg/t contre 515 kg/t) et un C/N (19 contre 15) plus importants pour l'amendement apporté sur la parcelle de Belval apportant ainsi une quantité de matière organique facilement minéralisable plus faible et donc une nutrition azotée moindre.

En résumé : En tendance, la modalité EM est à l'origine d'une diminution moyenne de vigueur entre 2018 et 2017 moins importante que les autres modalités, ce qui confirme les résultats des données physiologiques et d'azote des moûts et pourrait s'expliquer par une meilleure nutrition azotée. L'effet des EO et AM sur la vigueur est plus hétérogène et semble impacté par la date d'apport, la pluviométrie qui suit leur apport ainsi que leur ISMO.

b) Essai entretien du sol

L'évolution du diamètre des sarments entre 2018 et 2017 sur les modalités des parcelles ne montre pas de différences significatives entre les modalités d'après le test d'ANOVA1 résumé dans le *tableau 16*. Les résultats des tests sont disponibles en *annexe XVI*.

Au vu des résultats et des écarts-type, aucune tendance ne semble se dégager. **Les modalités d'entretien du sol n'ont donc pas eu d'impact sur le diamètre moyen des sarments à la suite de la première année de mise en place des modalités.**

De plus, on observe pour la parcelle de Festigny qui était la seule homogène à l'hiver 2017 avant la mise en place des modalités que le diamètre des sarments est toujours homogène à l'hiver 2018 (test ANOVA1) suite à la première année de modalité (*figure 35 ; résultats des tests disponibles en annexe XVII*). Ceci renforce donc l'hypothèse que les modalités de travail du sol n'ont pas impacté la vigueur de la vigne suite à la première année de mise en place des modalités. Cela confirmerait également les résultats des différents indicateurs physiologiques (qui ne faisaient pas ressortir de tendance entre les modalités).

En résumé : L'évolution de la vigueur a globalement été la même sur l'ensemble des modalités d'entretien du sol. Elle ne semble donc pas impactée par le changement des pratiques d'entretien du sol dès la première année ce qui confirme les tendances observées sur les indicateurs physiologiques et l'azote des moûts.

II) Etude de l'impact des pratiques sur le sol

II-1) Impact des pratiques sur les reliquats azotés

a) Essai fertilisation

La *figure 36* présente les résultats des reliquats azotés du sol en fonction des parcelles et des modalités à différentes dates.

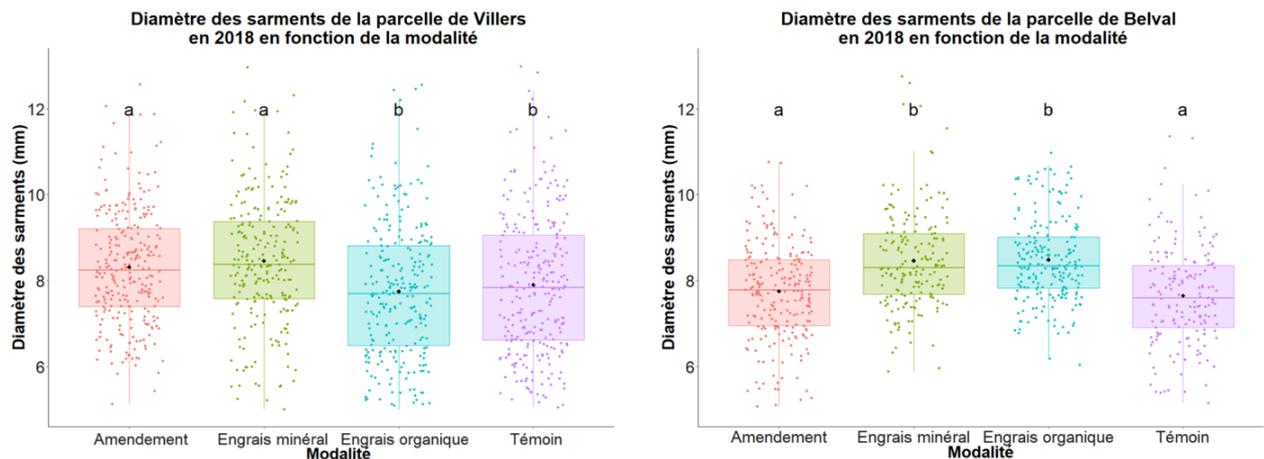


Figure 34 – Résultats de l’ANOVA1 du diamètre des sarments des parcelles de Villers et de Belval en fonction des modalités suite à la première année de mise en place des modalités

Tableau 16 – Résultats de l’ANOVA1 réalisée sur l’évolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017 des parcelles de l’essai entretien du sol en fonction des modalités

Modalité	Evolution du diamètre des sarments entre 2018 et 2017 (diamètre moyen 2018 / diamètre moyen 2017)
Enherbé	0,98 ± 0,02 a
Travail mécanique du sol	0,97 ± 0,01 a
Désherbé	0,97 ± 0,02 a

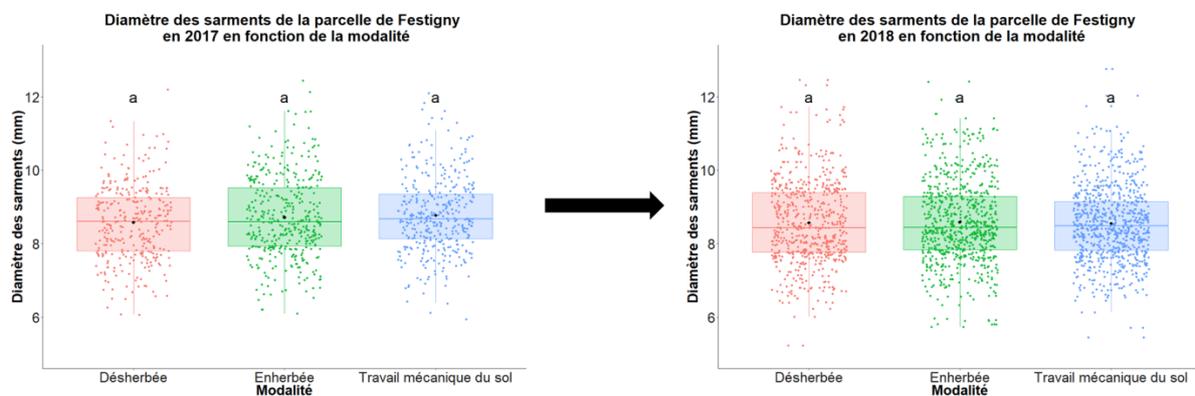


Figure 35 – Résultats de l’ANOVA1 sur le diamètre des sarments de la parcelle de Festigny avant (2017 à gauche) et après (2018 à droite) mise en place de la première année de modalités

On distingue deux types de comportements sur l'ensemble des parcelles : (i) des quantités homogènes de nitrates sur l'ensemble des modalités comme sur la parcelle de Villers. (ii) des quantités de reliquats azotés homogènes en fonction des modalités à l'exception de la modalité EM où l'on observe une forte augmentation de ces derniers entre le prélèvement avant et après ajout de l'engrais minéral. Ce type de comportement s'observe sur la parcelle des Riceys et de Belval où les augmentations sont respectivement de +29,7 kgN/ha et +11,4 kgN/ha.

Au vu des résultats on peut dire que l'apport d'E.M a entraîné une augmentation des quantités de reliquats azotés présents dans le sol sur les parcelles des Riceys et de Belval mais pas sur celle de Villers.

Cela pourrait être expliqué par la météo de chaque site : en effet, il n'a pas plu la semaine suivant l'ajout d'E.M sur les parcelles de Belval et des Riceys alors qu'une pluviométrie de plus de 18 mm a été enregistrée sur celle de Villers au lendemain de l'apport (*figure 37*). Cette dernière présente un sol de limons fins donc plus de drainage à l'origine de perte d'azote par lixiviation que sur les sols argileux (Di et Cameron, 2002) des parcelles des Riceys et de Belval. Autrement, l'engrais minéral aurait été complètement absorbé suite à son apport sur cette parcelle. De plus, les données à véraison 2019 indiquent que le stock d'azote dans la plante est plus important dans cette modalité. Ceci tend donc à renforcer cette hypothèse.

En faisant le lien entre les variables physiologiques et la quantité de reliquats azotés présents dans le sol, on observe que pour la modalité EM des parcelles des Riceys et Belval où la quantité de reliquats azotés est nettement plus importante que les autres modalités les stocks d'azote à véraison de la vigne étaient plus élevés que les autres modalités. On pourrait donc faire l'hypothèse que la quantité plus importante d'azote dans le sol a permis une plus grande absorption qui s'est traduite par un stock d'azote plus élevé dans la vigne à véraison.

En résumé : L'apport d'EM semble avoir entraîné une augmentation de la quantité de reliquats azotés du sol sur les parcelles de Belval et des Riceys (+29,7 kgN/ha et +11,4 kgN /ha) comparativement aux autres modalités qui sont globalement équivalentes entre elles (6,2 kgN/ha en moyenne aux Riceys et 12,9 kgN/ha à Belval). Le fait que cela n'ait pas été le cas sur la parcelle de Villers pourrait être lié à une forte pluie au lendemain de l'apport et donc à un processus de lixiviation ou à une absorption de la totalité de l'azote apporté sur cette modalité.

La quantité de reliquats azotés pour la modalité EM sur la parcelle de Belval et des Riceys pourrait être reliée au stock d'azote dans la vigne à véraison 2019 qui était également plus important que les autres modalités.

b) Essai entretien du sol

On observe à partir de la *figure 38* que les reliquats azotés des modalités désherbé et travail mécanique du sol sont supérieurs à la modalité enherbé à partir de la deuxième date pour l'ensemble des parcelles.

En considérant le sol sur les différentes modalités d'une même parcelle comme homogène, ce résultat pourrait être expliqué de deux façons. Premièrement, par une consommation d'azote plus importante sur la modalité enherbé (en moyenne 8,8 kgN/ha) que sur les modalités travail mécanique du sol et désherbé. En effet, l'écart n'intervenant entre les trois modalités qu'à partir de la période comprise entre mi-mai et mi-juin, l'explication pourrait être qu'au moment de la floraison et du pic d'absorption d'azote de la vigne (début juin) la quantité d'azote absorbée soit supérieure sur la modalité enherbé, par rapport aux deux autres modalités, du fait de la

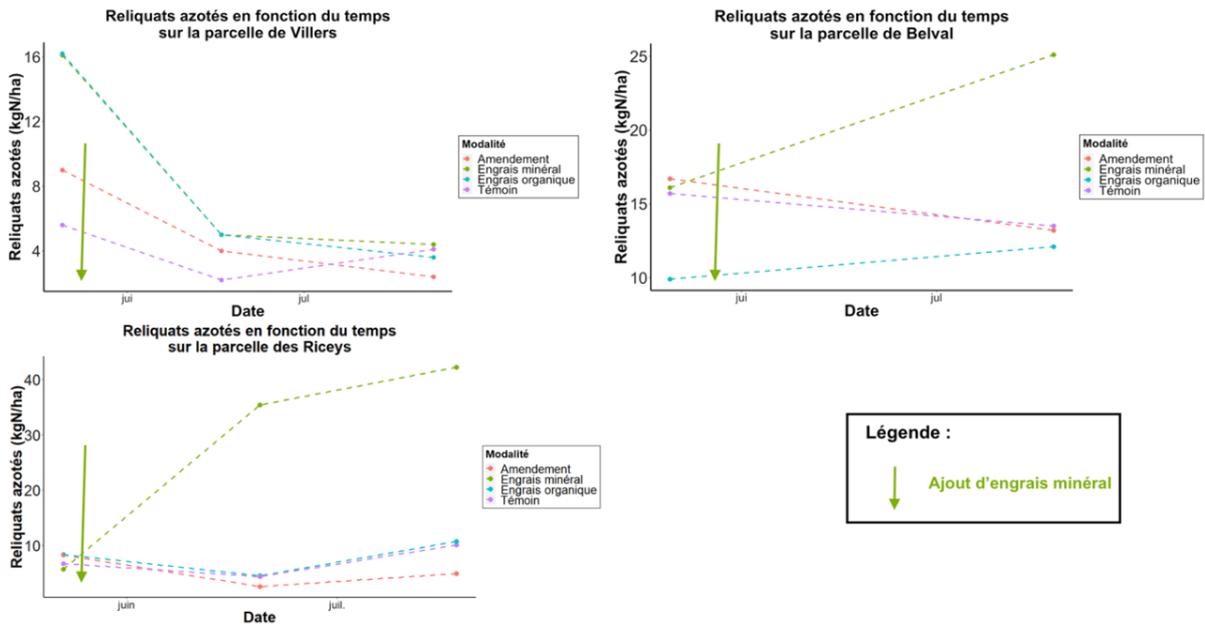


Figure 36 - Reliquats azotés en fonction du temps pour les parcelles de l'essai fertilisation en 2019

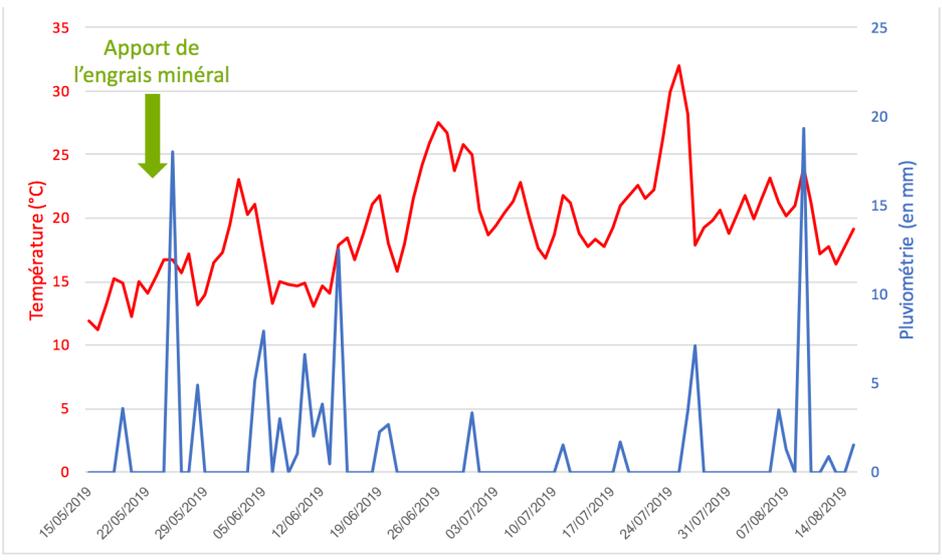


Figure 37 - Pluviométrie et température sur la parcelle de Villers lors de la période d'étude des reliquats azotés

présence d'un couvert végétal en plus de la vigne. La seconde explication pourrait être une stimulation de la minéralisation sur les modalités désherbé et travail mécanique du sol. Cependant d'après la bibliographie, bien que l'ajout d'herbicide puisse stimuler la minéralisation de la matière organique originaire du sol (Haney et al, 2002), la minéralisation de l'azote en surface (0-10cm) est supérieure dans les systèmes de conservation par rapport à des systèmes de travail du sol (Kandeler et al, 1999). Cette deuxième explication ne permet donc pas de comprendre la différence de reliquats azotés entre les modalités travail mécanique du sol et enherbé et renforce donc l'hypothèse de la première explication.

Ces données sont à prendre en compte dans le cadre du millésime 2019 avec un été très sec et des pluies éparses ayant très rarement dépassées les 10 mm tout au long de la période étudiée (Annexe XVIII) et donc des sols relativement peu chargés en eau. Il serait intéressant de réaliser l'expérience à nouveau avec des conditions climatiques différentes pour voir comment l'évolution des reliquats azotés se fait en fonction des modalités.

En résumé : La quantité de reliquats azotés était globalement homogène (8,9 kgN/ha ce qui représente moins de 10% des besoins azotés de la vigne) à l'échelle parcellaire entre les modalités avant floraison. Après la floraison, qui correspond au pic d'absorption de l'azote par la vigne, la modalité enherbé possède des quantités de reliquats azotés inférieurs aux autres modalités pour l'ensemble des parcelles. Il semblerait donc qu'au cours de cette période le couvert végétal ait également absorbé une partie de l'azote du sol entraînant une diminution des reliquats plus importante que sur les autres modalités. Cette compétition n'a cependant pas impacté les données physiologiques en 2019, il sera donc intéressant de voir si elle se retrouve sur l'azote des moûts.

II-2) Impact des pratiques sur l'humidité du sol

La *figure 39* présente les résultats d'humidité pondérale du sol au cours du temps sur les trois parcelles de l'essai travail du sol. Aucune tendance ne semble se dégager en fonction des modalités sur l'ensemble des parcelles. Il est donc impossible à partir de ces données de conclure à un impact de l'enherbement sur l'humidité pondérale du sol au cours de la deuxième année de la mise en place de l'enherbement.

Ceci pourrait s'expliquer de différentes façons. Premièrement, le fait de prélever uniquement sur l'horizon 0-20 cm pourrait ne pas être représentatif de l'état hydrique réel du sol. Deuxièmement, l'humidité pondérale du sol pourrait ne pas être un indicateur assez fin pour suivre cet état et les résultats auraient pu être différents en suivant l'humidité du sol via des sondes tensiométriques ou des capteurs plus fins de la variation de l'état hydrique du sol. Il serait donc intéressant de réaliser cette expérience à nouveau en utilisant un indicateur différent de l'état hydrique du sol.

En résumé : Les données étudiées n'ont pas permis de mettre en évidence un impact des pratiques d'entretien du sol sur son humidité pondérale. Le prélèvement sur l'horizon 0-20 cm n'était potentiellement pas représentatif de l'état hydrique du sol et l'humidité pondérale n'était peut-être pas un indicateur assez fin. Il serait donc intéressant de réaliser cette expérience à nouveau en utilisant des indicateurs différents de l'état hydrique du sol comme des sondes tensiométriques.

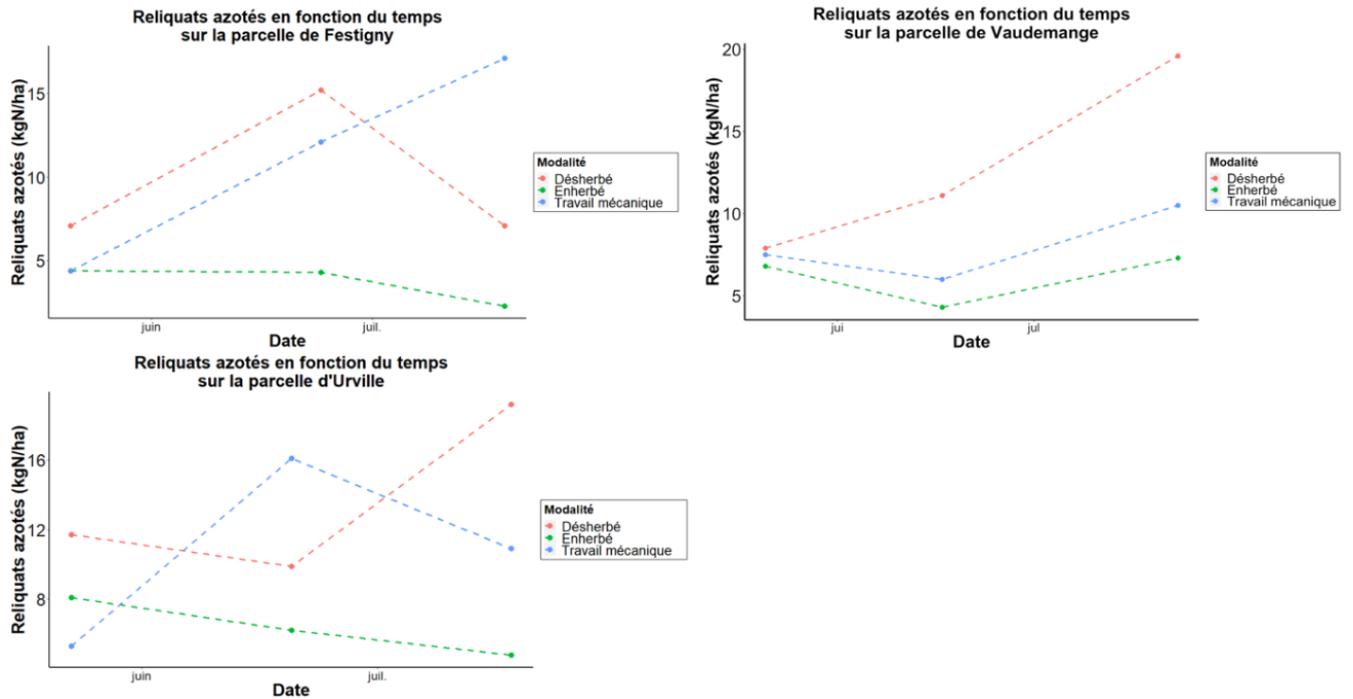


Figure 38 - Reliquats azotés en fonction du temps pour les parcelles de l'essai entretien du sol en 2019

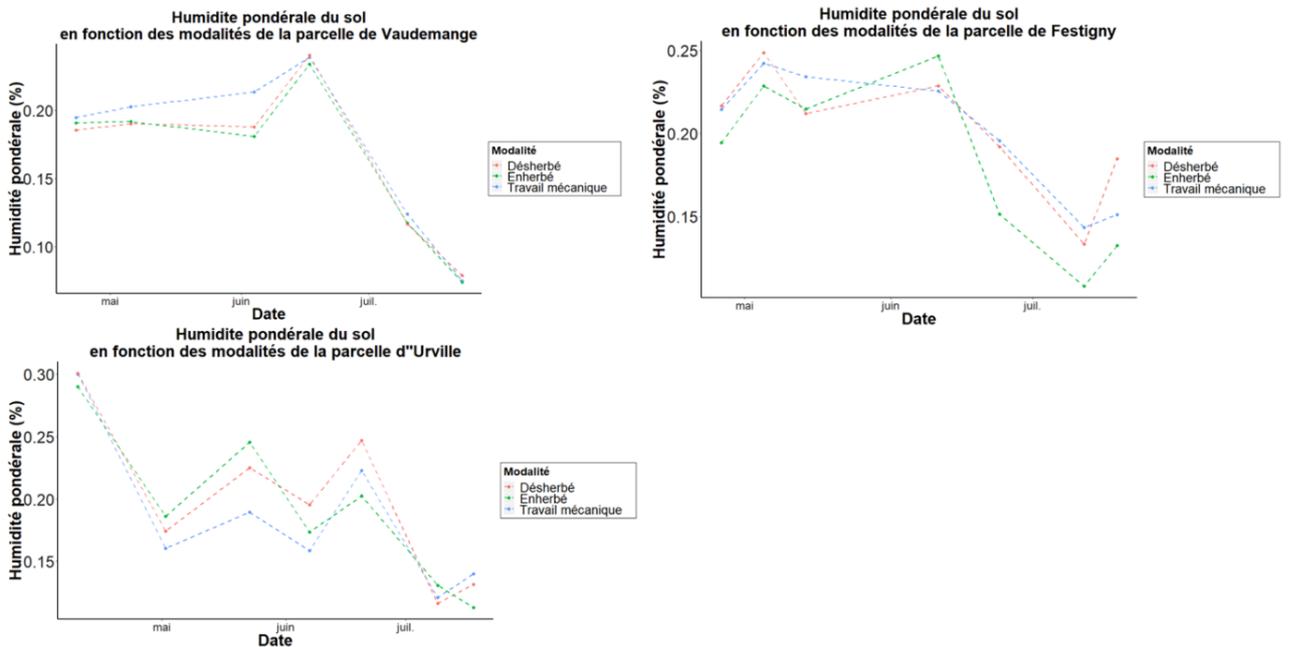


Figure 39 - Humidité pondérale du sol en fonction des modalités pour les différentes parcelles de l'essai entretien du sol

Conclusion

La vigueur de la vigne est le résultat d'interactions multiples entre le matériel végétal, la composition du sol, les conditions climatiques du millésime et les pratiques agronomiques exercées sur les parcelles. Bien que le millésime et les variables pédoclimatiques aient un impact très important sur la détermination de la vigueur, les vignerons peuvent agir via leur stratégie de fertilisation ou d'entretien du sol pour la moduler à court et moyen terme.

Cette étude a permis de produire une méthode d'analyse du suivi de la vigueur sur le vignoble champenois, afin d'étudier l'impact multifactoriel des pratiques et du pédoclimat sur la vigueur et prioriser ses facteurs. Une analyse (SWOT) des forces et faiblesses de cette méthode a été réalisée (*figure 40*) et permettra de la faire évoluer avec le temps.

Elle a également mis en évidence un impact des stratégies de fertilisation à court terme sur le maintien de la vigueur de la vigne en Champagne. Du point de vue des pratiques, une action plus importante et homogène des engrais minéraux a été observée comparativement à des engrais organiques ou à des amendements. D'un point de vue parcellaire, un impact plus faible des apports organiques a été observé sur la parcelle avec le stock d'azote des vignes le plus faible, qui possède également le taux de matière organique le plus bas et donc un potentiel de minéralisation de l'azote moins élevé que les autres parcelles.

A l'inverse, l'étude n'a pas permis de montrer un impact du passage d'un désherbage chimique en plein à un travail mécanique en plein ou à un enherbement couplé à un travail mécanique sur l'inter-rang suite aux deux premières années d'étude.

L'analyse des reliquats azotés sur les différentes parcelles a permis de mettre en lumière un impact des stratégies de fertilisation et d'entretien du sol sur leur quantité. Dans le contexte 2019 présentant un été très sec et peu de pluie, les engrais minéraux ont permis d'obtenir des quantités de reliquats azotés supérieures en cours de campagne par rapport aux engrais organiques ou aux amendements. D'un point de vue de l'entretien du sol, une diminution des reliquats azotés a été observée sur les modalités enherbées comparativement aux modalités de désherbage chimique en plein ou de travail mécanique du sol.

Afin d'approfondir et d'ajuster les analyses autour de ce travail, les données de 2018 et 2019 seront complétées avec celles des millésimes suivants. A long terme, cette étude visera également à déterminer les facteurs ayant le plus d'impact sur les variations de la vigueur de la vigne mais également de comprendre la résilience des différents systèmes.

De plus, les données recueillies au cours de cette étude ont également permis de travailler au calibrage du modèle STICS pour la vigne en Champagne. Cet outil pourrait permettre, à terme, de mieux comprendre l'ensemble des interactions intervenant sur la vigueur de la vigne en simulant un très grand nombre de variables physiologiques et pédoclimatiques (voire des scénarios fictifs de changement climatique) sur un très grand nombre de parcelles.

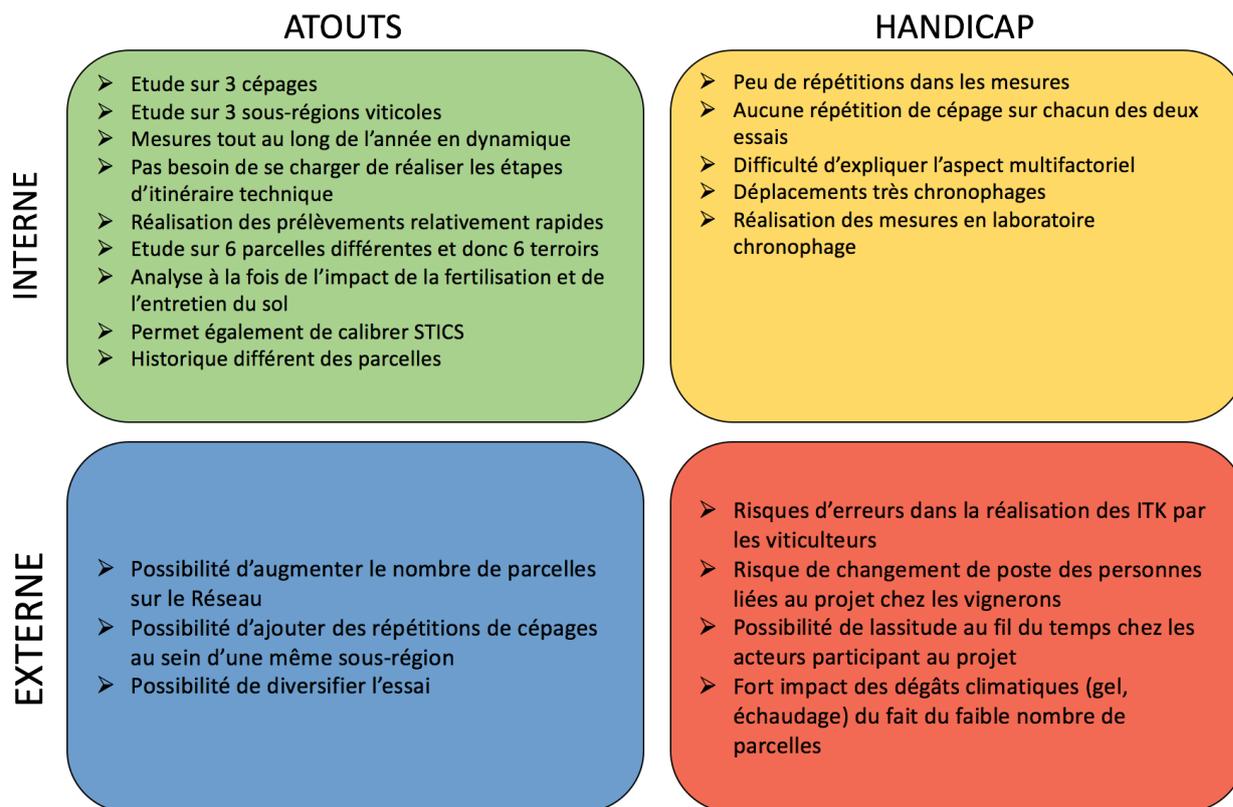


Figure 40 - Analyse SWOT réalisée sur l'expérimentation du Réseau Vigueur

Bibliographie

- Bonomelli A., Debuissou S., Descôtes A., 2019. Suivi par télédétection de l'enherbement du vignoble champenois. *Le vigneron champenois*, Février 2019, 63-75
- Brochet P., & Gerbier N., 1974. L'évapotranspiration : aspect Agrométéorologique évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle, Paris : Direction de la météorologie nationale, 67p
- Boulaine, J., 1995. Quatre siècles de fertilisation. *Étude de la gestion des sols*, 2, 201-208
- Bonneau J.M., Souchier B., 1979. Constituants et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron*, 27, 447-463.
- Carbonneau A., Deloire A., Torregrosa, L., Pellegrino, A., Jaillard, B., Métay, A., Ojeda H., Lebon E., Abbal, P. 2015. *Traité de la vigne* - 2e édition : Physiologie, terroir, Saint-Just-la-Pendue : Dunod, 573p.
- Celette F., 2007. Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen. Thèse de doctorat, sciences agronomiques. Montpellier SupAgro, 200 p.
- Champagnol, F., 1984. *Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Saint-Gély du Fesc : F Champagnol, 351 p.
- Cruziat, P. 1997. Les relations "plante-eau", de la cellule à la plante entière. In: C. Riou , R. Bonhomme , P. Chassin , A. Neveu , F. Papy , L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. Paris : INRA éditions, 11-40
- Descôtes A., Moncomble D., 2013. Champagne, environnement et développement durable 30 ans d'histoire. *Le vigneron champenois*, Novembre 2013, 32-60
- Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne, 2019. *Guide pratique de viticulture durable en Champagne*,. 265p.
- Chaves M., 1991. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of experimental botany*, 42, 1-16
- 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 and Tillage Research*, 88, 132-143.
- Delas J., Molot C., Soyer J. P., 1983. Influence d'une fertilisation azotée excessive, du porte-greffe et de la charge sur le comportement du « Merlot » en sol de graves du Bordelais. *2e Symp. sur la Physiologie de la Vigne*, Bordeaux.
- Dorji K., Behboudian M. H., Zegbe-Dominguez J. A., 2005. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Scientia Horticulturae*, 104(2), 137-149.
- Di H.J., Cameron K.C., 2002. Nitrate leaching in temperate agrosystems: source, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 237-256
- Emmett R. W., Harris A. R., Taylor R. H., McGechan J. K., 1998. Chapter eleven - *Grape diseases and vineyard protection*. Adelaide: Winetitles, 278p.
- Garcia, O., Morlet, M., Debuissou S., 2014. Modulation des pratiques culturales à l'aide du capteur Physiocup®, *Le Vigneron Champenois*, 31-37
- Haney R., Senseman S., Kruzts L.J., Hons F.M., 2002. Soil carbon and nitrogen mineralization as affected by atrazine and glyphosate. *Biology and Fertility of Soils*, 35(1), 35-40
- Hsiao T. C., Xu L-K., 2000. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1595-1616

- ITV France, 2002. L'enherbement permanent de la vigne. Les cahiers itinéraires d'ITV France, 4, 1-16
- Jacquemoud, F., 2017. Le travail du sol en question. *La vigne*, 294, 14-19
- Jarvis, S., Stockdale E., Sheperd, M., Powlson, D., 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils : processes and measurements. *Advances in Agronomy*, 57, 187-235
- Jeanros, B., Sahli, A., Jacot, P., 2003. Une fumure organique a-t-elle le même effet qu'une fumure minérale sur une prairie permanente. *Revue suisse agricole*, 35, 155-160
- Kliewer W. M., 1977. Grape coloration as influenced by temperature, solar radiation, nitrogen and cultivar, *Int. Symp. on the Quality of the Vintage*, 89-105
- Kliewer W. M., 1991. Methods for determining the nitrogen status of vineyards. *Proceedings of the Int. Symp. on Nitrogen in Grapes and Wines*, Seattle. 18-19 juin 1991, 133-147.
- Lagacherie P., Coulouma G., Ariagno P., Virat P., Boizard H., Richard G., 2006. Spatial variability of soil compaction over a vineyard region in relation with soils and cultivation operations. *Geoderma* 134, 207-216
- Le Cacheux J., 2012. *Agriculture mondiale et européenne : défis du XXIe siècle*. Rev. l'OFCE, 120, 195–234
- le Sueur D., Panigai L., 2005. Enherbement et vins. *Le vigneron champenois*, Octobre 2005, 20-35.
- Masunga, H-M., Uzokwe V.N., Mlay, P.D., Odeh I., Singh A., Buchan D., De Neve S., 2016. Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used in agriculture. *Applied Soil Ecology*, 101, 185–193
- Morlat, R., Venin, G., 1981. Effets comparés de deux techniques d'entretien du sol sur l'enracinement de la vigne et sur le milieu édaphique, *EDP Sciences*, 1(10), 887-896
- N'Dayegamiye, A., Goulet, M., Laverdière, M. R., 1997. Effet à long terme d'apports d'engrais minéraux et de fumier sur les teneurs en C et en N des fractions densimétriques et des agrégats du loam limoneux Le Bras. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(3), 351-358
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M., O. Gasser, M., 2007. La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation de l'azote. CRAQQ – OAQ, Colloque sur l'azote.
- Techn'itab. *L'enherbement de la vigne*. Disponible sur Internet : http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_viti/viti%20enherbement.pdf
- Tello, J., Ibáñez, J. 2014. Evaluation of indexes for the quantitative and objective estimation of grapevine bunch compactness. *Vitis* 53 (1), 9–16
- Peynaud E., 1972. L'influence des engrais azotés sur la composition des moûts et des vins. *3e Int. Œnol. Symp.* Stellenbosch, 1972.
- Pouget, R., Delas, J., 1984. Action de la concentration de la solution nutritive sur quelques caractéristiques physiologiques et technologiques chez *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. I. - Vigueur, rendement, qualité du moût et du vin. *Agronomie*, 4(5), 437-442
- Riou, C., Pieri, P., Le Clech, B., 1994. Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. Formulation simplifiée de la transpiration. *Vitis*, 33, 109-115
- Soane, B.D., 1990. The role of organic matter in soil compactibility : a review of some aspects. *Soils & Tillage Research*, 16, 1-2

Stevenson, F.J., 1994. Humus Chemistry : Genesis, Composition, Reactions. United States of America : Ed Wiley & Sons, 350p.

Valdes Gomez, H., 2007. Relations entre états de croissance de la vigne et maladie cryptogamiques sous différentes modalités d'entretien du sol en région méditerranéenne. Thèse de doctorat, sciences du sol. Montpellier SupAgro, 257p.

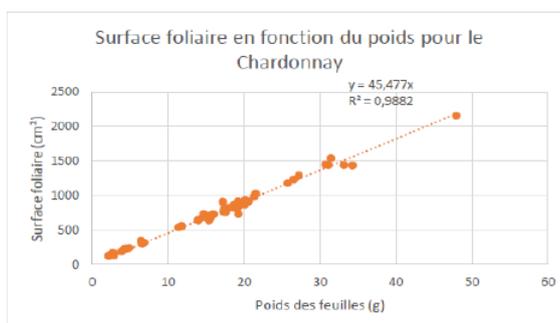
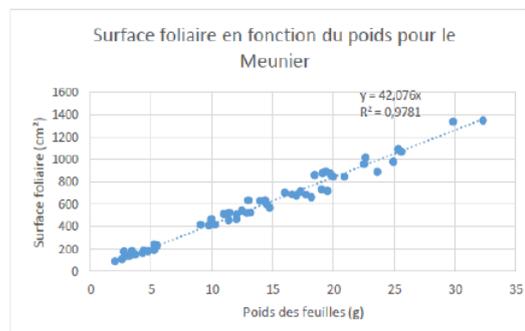
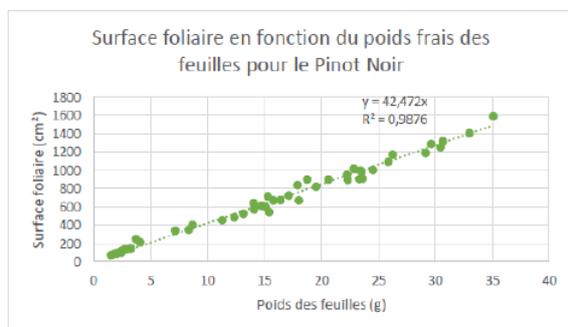
van Leeuwen, C., Friant, Ph., Soyer, J-P., Molot, Ch. Chone, X., Dubourdieu, D., 2000. L'intérêt du dosage de l'azote total et de l'azote assimilable dans le moût comme indicateur de la nutrition azotée de la vigne. *Vigne Vin*, 34, 75-82

Annexes :

Annexe I - Résumé des rapports en lien avec la vitesse de minéralisation et d'organisation des amendements (Jedidi, N., et al, 1994)

Processus	Rapport en lien avec la vitesse du processus
Minéralisation	C/N
Minéralisation	Somme des fibres insolubles dans les détergents neutres (hémicellulose + cellulose + lignine) sur l'azote total
Minéralisation	Somme des fibres insolubles dans les détergents acides (cellulose + lignine) sur l'azote total
Minéralisation	Teneur en azote de l'amendement
Organisation	Teneurs en fibres insolubles dans les détergents acides

Annexe II - Représentation des équations reliant la surface foliaire au poids frais des feuilles pour les principaux cépages de Champagne (CIVC, 2019)



Annexe III - Comptage des bourgeons gelés réalisé sur les parcelles de Festigny et de Belval

Parcelle	Modalité	Bourgeons gelés
Festigny	Travail mécanique du sol	63%
Festigny	Enherbé	38%
Festigny	Dés herbé	27%
Belval	Engrais minéral	57%
Belval	Engrais organique	61%
Belval	Amendement	58%
Belval	Témoin	58%

Annexe IV - Test de Kruskal-Wallis pour déterminer l'homogénéité de vigueur sur les parcelles de l'essai fertilisation

Test parcelle des Riceys :

```
> kruskal.test(Diamètre-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 10.33, df = 3, p-value = 0.01596

> pairwise.wilcox.test(data$Diamètre, data$Modalité,p.adjust.method ="holm" )

Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test

data: data$Diamètre and data$Modalité
```

	Amendement	Engrais minéral	Engrais organique
Engrais minéral	0.5345	-	-
Engrais organique	0.8809	0.1260	-
Témoin	0.4661	0.0087	0.8809

P value adjustment method: holm

Test parcelle de Belval :

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 9.2984, df = 3, p-value = 0.02558

> pairwise.wilcox.test(data$Diamètre, data$Modalité,p.adjust.method ="holm" )

Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test

data: data$Diamètre and data$Modalité
```

	Amendement	Engrais minéral	Engrais organique
Engrais minéral	1.000	-	-
Engrais organique	0.092	0.063	-
Témoin	1.000	1.000	0.100

P value adjustment method: holm

Test parcelle de Villers :

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.9493, df = 3, p-value = 0.267
```

Annexe V - Test de Kruskal-Wallis pour déterminer l'homogénéité de vigueur sur les parcelles de l'essai entretien du sol

Test parcelle de Vaudemange :

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 26.05, df = 2, p-value = 2.205e-06

> pairwise.wilcox.test(data$Diamètre, data$Modalité,p.adjust.method ="holm" )

Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test

data: data$Diamètre and data$Modalité
```

	Dés herbé	Enherbé
Enherbé	8.2e-07	-
Travail mécanique du sol	0.0135	0.0069

P value adjustment method: holm

Test parcelle d'Urville :

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 42.523, df = 2, p-value = 5.839e-10

> pairwise.wilcox.test(data$Diamètre, data$Modalité,p.adjust.method ="holm" )

Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test

data: data$Diamètre and data$Modalité
```

	Dés herbé	Enherbé
Enherbé	2.3e-10	-
Travail mécanique	1.3e-06	0.028

P value adjustment method: holm

Test parcelle de Festigny:

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 5.1279, df = 2, p-value = 0.077
```

Annexe VI - Facteur de correction des modalités des parcelles

Parcelle	Modalité	Facteur de correction
Riceys	Engrais minéral	0,955
Urville	Enherbé	0,965
Urville	Travail mécanique	0,974
Vaudemange	Enherbé	1,037
Vaudemange	Travail mécanique	1,018

Annexe VII - Test ANOVA1 réalisés sur les variables écophysologiques de l'essai fertilisation à floraison 2018

Test ANOVA 1 azote des feuilles et rameaux :

```
> lm1 <- lm(Azote.F.R-Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Azote.F.R-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Azote.F.R
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  4 0.033634 0.0084084  0.4742 0.7541
Residuals 10 0.177314 0.0177314
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.91223, p-value = 0.1465

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  4  0.368 0.8261
      10
```

Test ANOVA 1 vitesse de croissance SFT:

```
> lm1 <- lm(Vitesse.croissance.SFT-Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Vitesse.croissance.SFT-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Vitesse.croissance.SFT
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  2 0.008763 0.0043813  0.1391 0.8729
Residuals  6 0.189001 0.0315001
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.95641, p-value = 0.7601

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  2  0.5561 0.6004
      6
```

Test ANOVA 1 masse sèche sur biomasse :

```
> lm1 <- lm(MS...B-Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(MS...B-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: MS...B
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  2 0.020010 0.010005  0.6314 0.5638
Residuals  6 0.095069 0.015845
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.94368, p-value = 0.6212

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  2  0.4471 0.6592
      6
```

Annexe VIII - Test statistiques réalisés sur les variables écophysiologicals de l'essai entretien du sol à floraison 2018

Test ANOVA 1 azote des feuilles et rameaux :

```
> lm1 <- lm(Azote.F.R~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Azote.F.R~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Azote.F.R
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 1 0.000641 0.0006406  0.03 0.8709
Residuals 4 0.085392 0.0213480
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.90422, p-value = 0.3995

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 1  0.5681 0.4929
      4
```

Test ANOVA 1 masse sèche sur biomasse :

```
> lm1 <- lm(MS...B~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(MS...B~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: MS...B
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 1 0.005461 0.0054609  0.2848 0.6219
Residuals 4 0.076707 0.0191768
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.90357, p-value = 0.3955

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 1  0.0407  0.85
      4
```

Test Kruskal-Wallis vitesse de croissance SFT:

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Vitesse.croissance.SFT~Modalité, data=data)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data: Vitesse.croissance.SFT by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 0.42857, df = 1, p-value = 0.5127
```

Annexe IX - Test statistiques réalisés sur les variables écophysologiques de l'essai fertilisation à véraison 2018 et 2019

Test ANOVA 1 azote des feuilles, rameaux et grappes en 2018:

```
> reg.aov1 <- lm(AzoteF.R.G-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: AzoteF.R.G
  Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 2 0.05928 0.029642 0.3867 0.6951
Residuals 6 0.45991 0.076652
> shapiro.test(residuals(lm1))

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.93224, p-value = 0.5029

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2 0.12 0.889
      6
```

Test ANOVA 1 rapport feuille/fruit en 2018 :

```
> lm1 <- lm(Feu_fruit-Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Feu_fruit-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Feu_fruit
  Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 2 0.035219 0.017610 0.3503 0.718
Residuals 6 0.301601 0.050267
> shapiro.test(residuals(lm1))

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.93218, p-value = 0.5023

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2 0.4856 0.6376
      6
```

Test Kruskal-Wallis azote des feuilles, rameaux et grappes en 2019:

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(AzoteF.R.G-Modalité, data=data)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: AzoteF.R.G by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 1.8667, df = 2, p-value = 0.3932
```

Test ANOVA 1 rapport feuille/fruit en 2019:

```
> reg.aov1 <- lm(Feu_fruit-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Feu_fruit
  Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 2 0.01049 0.005245 0.0415 0.9596
Residuals 6 0.75854 0.126424
> shapiro.test(residuals(lm1))

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.91543, p-value = 0.3557

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2 0.3251 0.7344
      6
```

Test ANOVA 1 compaction en 2018:

```
> reg.aov1 <- lm(Compaction-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Compaction
  Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 2 0.000913 0.0004567 0.0328 0.9679
Residuals 6 0.083591 0.0139318
> shapiro.test(residuals(lm1))

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.93007, p-value = 0.482

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2 3e-04 0.9997
      6
```

Test ANOVA 1 compaction en 2019:

```
> lm1 <- lm(Compaction-Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Compaction-Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Compaction
  Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 2 0.016074 0.0080368 0.2989 0.7521
Residuals 6 0.161319 0.0268865
> shapiro.test(residuals(lm1))

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.93096, p-value = 0.4906

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
  Df F value Pr(>F)
group 2 0.4378 0.6645
      6
```

Annexe X - Test statistiques réalisés sur les variables écophysologiques de l'essai entretien du sol à véraison 2018

Test ANOVA 1 azote des feuilles, rameaux et grappes :

```
> reg.aov1 <- lm(AzoteF.R.G~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: AzoteF.R.G
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  2  0.011499  0.0057495  1.3067  0.338
Residuals  6  0.026400  0.0044000
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.91799, p-value = 0.3758

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  2  1.1533  0.3769
      6
```

Test ANOVA 1 rapport feuille/fruit :

```
> lm1 <- lm(Feu_fruit~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Feu_fruit~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Feu_fruit
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  1  0.000514  0.000514  0.0077  0.9343
Residuals  4  0.267081  0.066770
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.93625, p-value = 0.6292

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  1  0.6135  0.4772
      4
```

Test ANOVA 1 compaction :

```
> reg.aov1 <- lm(Compaction~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Compaction
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  1  0.022597  0.022597  1.0344  0.3666
Residuals  4  0.087380  0.021845
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.92822, p-value = 0.5664

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  1  0.2641  0.6344
      4
```

Annexe XI - Test ANOVA1 d'azote total des mouës par rapport au témoin en fonction des modalités pour l'essai entretien du sol

```
> lm1 <- lm(Azote_mout~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Azote_mout~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Azote_mout
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  1  0.038863  0.038863  1.1321  0.3473
Residuals  4  0.137316  0.034329
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.87289, p-value = 0.238

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  1  0.3863  0.5679
      4
```

Annexe XII - Test ANOVA1 du rendement par rapport au témoin en fonction des modalités pour l'essai entretien du sol

```

> lm1 <- lm(Rendement~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Rendement~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Rendement
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité  1  0.0068661 0.0068661  1.142 0.3454
Residuals  4  0.0240493 0.0060123
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.8103, p-value = 0.07261

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  1  0.0273 0.8768
      4

```

Annexe XIII - Base de données utilisées pour réaliser un test ANOVA1 sur l'évolution du diamètre des sarments entre 2018 et 2017 en fonction des modalités

Lieu	Modalité	Diamètre moyen des sarments en 2017	Diamètre moyen des sarments en 2018	Evolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017
Riceys	Amendement	8,96	9,03	1,01
Riceys	Engrais minéral	9,13	9,16	1,00
Riceys	Engrais organique	8,88	8,64	0,97
Riceys	Témoin	8,72	9,03	1,04
Belval	Amendement	8,76	7,69	0,88
Belval	Engrais minéral	8,76	8,40	0,96
Belval	Engrais organique	8,92	8,49	0,95
Belval	Témoin	8,79	7,65	0,87
Villers	Amendement	9,03	8,29	0,92
Villers	Engrais minéral	9,19	8,50	0,92
Villers	Engrais organique	9,25	7,68	0,83
Villers	Témoin	9,19	7,86	0,86
Urville	Dés herbé	9,09	8,65	0,95
Urville	En herbé	9,42	9,03	0,96
Urville	Travail mécanique	9,34	8,93	0,96
Vaudemange	Dés herbé	9,00	8,67	0,96
Vaudemange	En herbé	8,68	8,56	0,99
Vaudemange	Travail mécanique	8,85	8,59	0,97
Festigny	Dés herbé	8,60	8,57	1,00
Festigny	En herbé	8,72	8,61	0,99
Festigny	Travail mécanique	8,79	8,55	0,97

Annexe XIV - Test ANOVA1 d'évolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017 en fonction des modalités pour l'essai fertilisation

```
> lm1 <- lm(Evolution~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Evolution~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Evolution
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 3 0.003686 0.0012285 0.2237 0.8774
Residuals 8 0.043944 0.0054930
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.95707, p-value = 0.7414

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 3 0.1573 0.922
      8
```

Annexe XV - Tests de Kruskal-Wallis réalisés sur les diamètres des sarments des différentes modalités des parcelles de Villers (gauche) et de Belval (droite)

Parcelle de Villers :

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre~Modalité, data=data)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 46.654, df = 3, p-value = 4.118e-10

> pairwise.wilcox.test(data$Diamètre, data$Modalité,p.adjust.method="holm" )

      Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test

data: data$Diamètre and data$Modalité

      enhMRam enhMRmin enhMRorg
enhMRmin 0.26399 - -
enhMRorg 4.9e-06 6.7e-08 -
enhMRtem 0.00059 2.4e-05 0.28654

P value adjustment method: holm
```

Parcelle de Belval :

```
> #Test de Kruskal-Wallis
> kruskal.test(Diamètre~Modalité, data=data)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data: Diamètre by Modalité
Kruskal-Wallis chi-squared = 86.469, df = 3, p-value < 2.2e-16

> pairwise.wilcox.test(data$Diamètre, data$Modalité,p.adjust.method="holm" )

      Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test

data: data$Diamètre and data$Modalité

      Amendement Engrais minéral Engrais organique
Engrais minéral 3.6e-08 - -
Engrais organique 1.5e-11 0.73 -
Témoins 0.73 4.2e-09 2.7e-12

P value adjustment method: holm
```

Annexe XVI - Test ANOVA1 d'évolution du diamètre moyen des sarments entre 2018 et 2017 en fonction des modalités pour l'essai entretien du sol

```
> lm1 <- lm(Evolution~Modalité, data=data)
> reg.aov1 <- lm(Evolution~Modalité, data=data)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: Evolution
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Modalité 2 0.00017678 8.8389e-05 0.3041 0.7485
Residuals 6 0.00174397 2.9066e-04
> shapiro.test(residuals(lm1))

      Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(lm1)
W = 0.94089, p-value = 0.5913

> leveneTest(residuals(lm1)~data$Modalité)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 2 0.3726 0.7038
      6
```

Annexe XVII – Test de Kruskal Wallis réalisé sur le diamètre des sarments mesurés en fonction des modalités sur la parcelle de Festigny en 2018

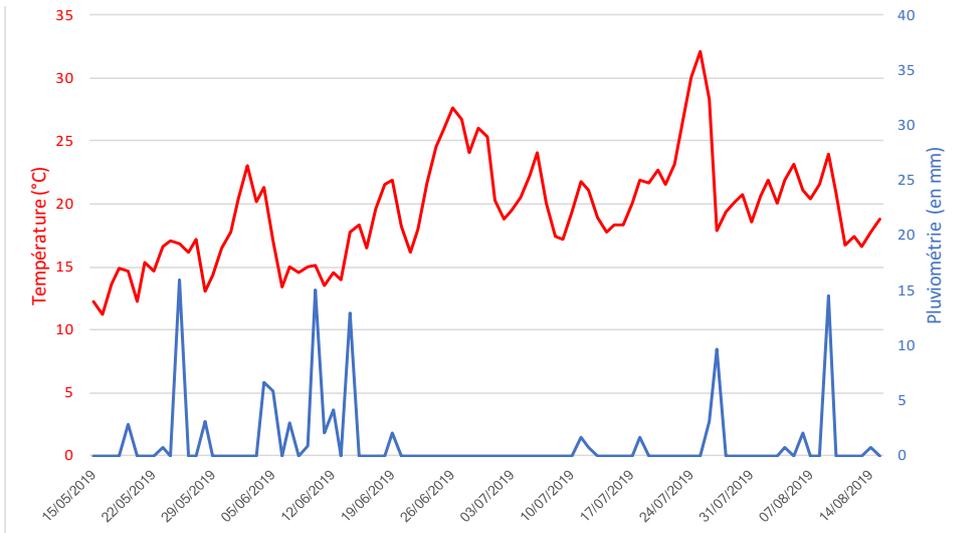
```
> kruskal.test(Diamètre~Modalité, data=data)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

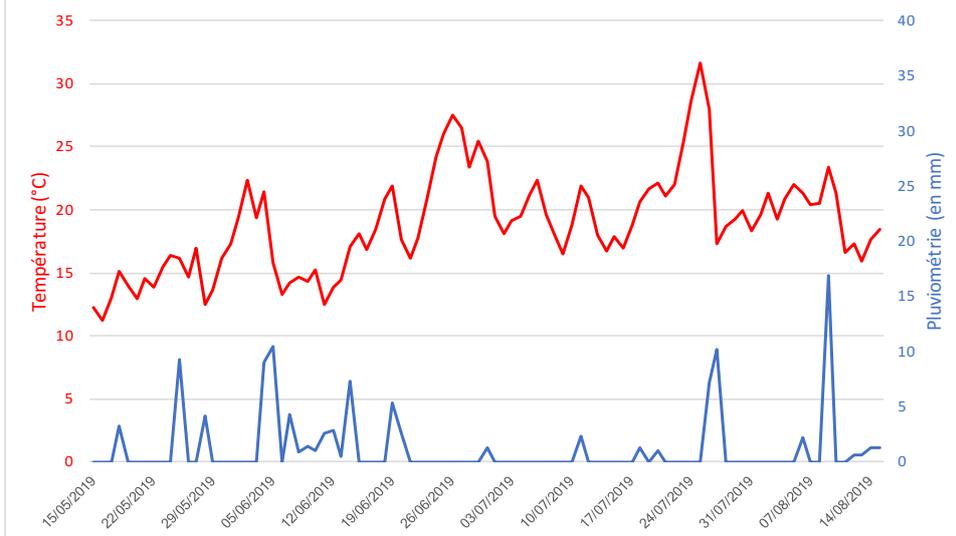
```
data: Diamètre by Modalité
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 0.43355, df = 2, p-value = 0.8051
```

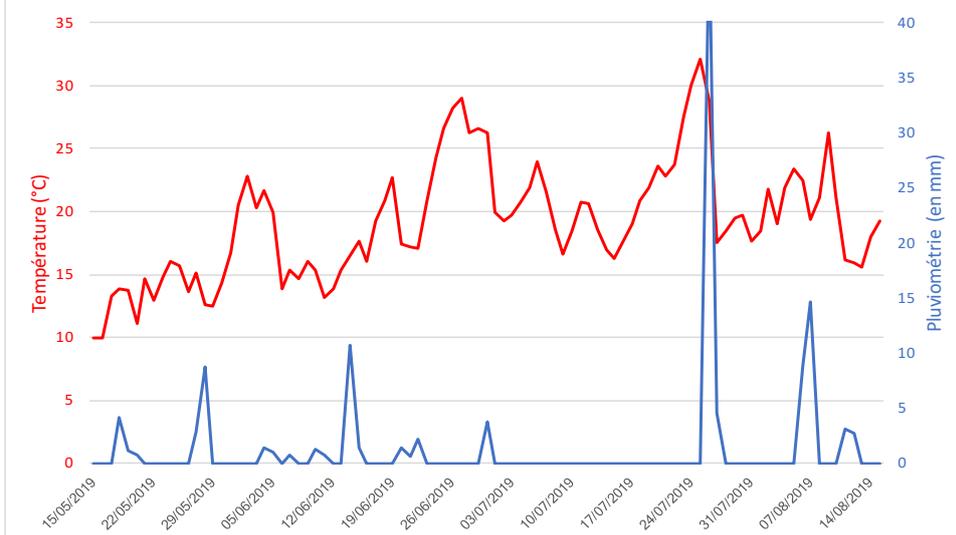
Annexe XVIII - Température et pluviométrie sur les parcelles de l'essai entretien du sol lors de la période d'étude des reliquats azotés



Température et pluviométrie journalière sur la parcelle de Festigny



Température et pluviométrie journalière sur la parcelle d'Urville



Résumé / Abstract

Étude sur la restauration ou le maintien de la vigueur sous différentes stratégies de fertilisation et d'entretien du sol

Résumé : Dans un contexte d'évolution des pratiques vers des pratiques plus durables, de nombreux Vignerons et Maisons ont abandonné les herbicides et modifié leurs pratiques de fertilisation et d'entretien du sol. Cependant, ces nouveaux itinéraires culturaux ont vu l'apparition de différentes difficultés écophysiologiques comme la diminution de la vigueur ou des rendements. L'objectif de cette étude est de comprendre quelles stratégies de fertilisation et de travail du sol permettent de restaurer ou d'augmenter la vigueur de la vigne. Pour répondre à cet objectif, un ensemble d'indicateurs écophysiologiques et pédoclimatiques ont été choisis et suivis sur un réseau de six parcelles dispersées à travers la Champagne représentant les trois cépages principaux de l'AOC. Deux années de données écophysiologiques ont été croisées aux données pédoclimatiques ainsi qu'aux itinéraires culturaux afin de comprendre quelles stratégies sont les plus efficaces pour maintenir la vigueur. Cette étude s'est réalisée à deux échelles, la première interparcelle pour comprendre de façon globale quelles pratiques sont les plus efficaces. La seconde à l'échelle parcelle pour déterminer quelles pratiques sont les plus pertinentes en fonction des données pédoclimatiques des parcelles.

Mots-clés : Vigueur, Fertilisation, Entretien du sol, Indicateur, Ecophysiologie, Pédoclimat, Itinéraire technique

Study on the restoration or maintaining of vigour under different strategies of fertilisation and maintenance of the soil

Abstract: In a context of practices' evolution to more sustainable practices, a lot of Vignerons and Maisons have given up herbicides and modified their practice of fertilisation and of the maintenance of the soil. Yet, these new agronomic models have generated new ecophysiological difficulties as the decrease of vigour or yields. The aim of this study is to understand which strategies of fertilisation or maintenance of the soil allowed to restate or maintain vines' vigor. To achieve this aim, a set of ecophysiological, soil and climate conditions indicators have been chosen and followed on a network of six parcels dispersed through Champagne representing the three main grape varieties of the AOC. Two years of ecophysiological data have been cross-referenced to climate and soil data as well as vineyard management practices to try to understand which practices were more efficient to maintain vigor. This study has been done on two scales, the first one inter-plot to understand overall which practices are the most efficient. The second one at a plot scale to determine which practices are the most relevant according to the soil and climate conditions.

Keywords: Vigor, Fertilisation, Maintenance of the soil, Indicators, Ecophysiology, Soil and climate condition, Vineyard management practice



2 place Pierre Viala 34060 MONTPELLIER cedex 2