HAL
open science

Impact de l'enherbement et du travail du sol sur l'assimilation des éléments minéraux par la plante

Matthieu Chazalon

To cite this version:

Matthieu Chazalon. Impact de l'enherbement et du travail du sol sur l'assimilation des éléments minéraux par la plante. Agronomie. 2020. dumas-03253936

HAL Id: dumas-03253936

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03253936v1

Submitted on 8 Jun 2021

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.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement

SupAgro Montpellier

SRDV
société de recherche et de développement viticole

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

présenté pour l'obtention du

DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME

option : Viticulture-Œnologie

Impact de l'enherbement et du travail du sol sur l'assimilation des éléments minéraux par la plante

par

Matthieu CHAZALON

Année de soutenance : 2020

Organisme d'accueil : Société de Recherche et de Développement Viticole (SRDV)
35 rue de la Combe du Meunier, 11100 Montredon des Corbières

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement

SupAgro Montpellier

SRDV
société de recherche et de développement viticole

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

présenté pour l'obtention du

DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME

option : Viticulture-Œnologie

Impact de l'enherbement et du travail du sol sur l'assimilation des éléments minéraux par la plante

par

Matthieu CHAZALON

Mémoire préparé sous la direction de :
Aurélie METAY

Présenté le :12/10/2020

Organisme d'accueil : Société de Recherche et de Développement Viticole (SRDV),
35 rue de la Combe du Meunier, 11100 Montredon des Corbières

Maître de stage :
Guillaume DESPERRIERES

REMERCIEMENTS

En premier lieu, j'aimerais remercier Guillaume Desperrières et Matthieu Dubernet pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer ce stage au sein de la SRDV et des laboratoires Dubernet où j'ai beaucoup appris.

Un grand merci à Guillaume, Manon, Nicolas et Delphine pour leur disponibilité et leurs conseils d'ingénieurs agronomes avisés. Je les remercie pour leur confiance, leur temps et bien sûr pour la bonne ambiance au sein de cette équipe.

Merci à eux pour l'initiation à l'analyse pétiolaire et plus globalement à l'agro-œnologie, pour pousser la réflexion plus loin et accompagner les changements viticoles de demain.

Merci à Fanny, Maxime et Sullivan pour toutes les analyses.

Merci à tous les œnologues (Paula, Tatiana, Mélanie, Nicolas, Damien, Guillaume et Sylvain) pour les connaissances transmises.

A Nicolas et Damien pour leur aide précieuse dans des tournées oeno où je ne cesse d'apprendre.

A Louis pour la touche québécoise et la bonne humeur.

Enfin, merci à ma tutrice Aurélie Metay pour sa réactivité et son sens aiguisé de la pédagogie.

TABLE DES MATIERES

Partie 1 Introduction **1**

Partie 2 Contexte, état de l'art et problématique **3**
2.1 L'enherbement en viticulture **3**
2.2 Synthèse bibliographique : l'alimentation minérale de la vigne et l'enherbement **3**
a) La nutrition minérale de la vigne 3
b) Facteurs d'influence de la nutrition minérale 7
c) Enherbement et travail du sol 11
2.3 Formulation de la problématique **19**
a) Contexte Languedocien 19
b) Création de la Société de Recherche et Développement Viticole (SRDV) 19
c) Problématique 21

Partie 3 Matériels et méthodes **23**
3.1 Dispositif expérimental **23**
a) Parcelle à l'étude 23
b) Caractérisation agronomique du sol 23
c) Protocole expérimental 23
3.2 Mesures et méthodes de suivi **25**
a) Suivi du couvert 27
b) Assimilation minérale 27
c) Évaluation de la vigueur et de la contrainte hydrique 31
d) Estimation du rendement 33
3.3 Stratégie d'analyse des données **35**

Partie 4 Résultats et interprétations **37**
4.1 Caractérisation des conditions pédoclimatiques, de l'évolution du couvert **37**
a) Caractérisation du millésime 2020 37
b) Suivi du couvert végétal 37
c) Assimilations minérales 41
4.2 Vigueur et statut hydrique **43**
a) Mesures liées à la vigueur et à la canopée 43
b) Mesures liées à l'état hydrique 45
c) Rendement 47
4.3 Mise en relation avec les autres indicateurs viticoles et œnologiques **47**

Partie 5 Limites, perspectives et conclusion de cette étude **51**
5.1 Limites à l'interprétation des résultats et perspectives **51**
a) Limites 51
b) Perspectives 53
5.2 Conclusion **57**

Bibliographie

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Couvert végétal sur l'inter-rang, parcelle expérimentale au sud de Narbonne 2
Figure 2 : Rythme d'absorption de l'azote par la vigne et sa libération par le sol 6
Figure 3 : Rythme d'absorption des éléments au cours du cycle végétatif 6
Figure 4 : Schéma explicatif du lien entre assimilation azotée et conditions climatiques en situation de printemps favorable..... 12
Figure 5 : Services et dysservices d'un enherbement..... 14
Figure 6 : Temporalité des services attendus d'un couvert végétal 14
Figure 7 : Outils de destruction du couvert sans travail du sol..... 16
Figure 8 : Synthèse des outils analytiques permettant le suivi complet de l'assimilation minérale au cours la saison 18
Figure 9 : Schéma méthodologique de l'essai 20
Figure 10 : Profil pédologique de la parcelle d'essai ; description des horizons et résultats d'analyse de sol par horizon..... 22
Figure 11 : Représentation graphique des modalités..... 24
Figure 12 : Répartition des mesures et des interventions sur le cycle 26
Figure 13 : Calcul du taux de couverture 28
Figure 14 : MP-AES (Agilent technologies 4200 ®) et NIR Foss ® au laboratoires Dubernet..... 28
Figure 15 : N-Tester Yara ® en cours d'utilisation 30
Figure 16 : Azote massique moyen..... 36
Figure 17 : pluviométrie sur la saison culturale 2020 36
Figure 18 : Evolution du couvert végétal entre avril et mai 38
Figure 19 : Quelques adventices sur la parcelle au 15 mai 38
Figure 20 : Taux de couverture du sol par les couverts un mois après destruction 38
Figure 21 : Dynamique d'assimilation de l'azote sur la parcelle d'essais..... 42
Figure 22 : Boxplot des mesures de SECV/m2 des différentes modalités..... 44
Figure 23 : Potentiels de tige par modalité au 21 août 2020..... 46
Figure 25 : Poids des grappes en fonction des modalités de l'essai..... 46
Figure 26 : Cercle des corrélations et graphique des individus de l'ACP..... 48
Figure 27 : Matrice de corrélation liant les indices de vigueur, le statut azoté, le taux de couverture du sol et le taux de mildiou sur grappe 50

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Prélèvements et rôles des éléments minéraux chez la vigne, synthèse bibliographique. 4
Tableau 2 : Antagonismes et synergie des éléments minéraux 8
Tableau 3 : Résultats de l'analyse de sol de la parcelle expérimentale 22
Tableau 4 : Modalités mises en œuvre sur la parcelle à l'étude 24
Tableau 5 : Limites de quantification et incertitude 28
Tableau 6 : Stratégies d'analyse des données 35
Tableau 7 : Stades phénologiques sur la parcelle à l'essai en 2020 36
Tableau 8 : estimation des restitutions potentielles en éléments majeurs 39
Tableau 9 : Résultats de l'analyse cytométrique sur les échantillons de sol 41
Tableau 10 : Evolution de l'indice NDVI au cours du cycle 44
Tableau 11 : Données issues des mesures au N-Tester 46
Tableau 13 : Poids moyen des grappes par modalité et estimations de rendement 48
Tableau 14 : Eboulis de valeurs propres 47
Tableau 15 : Synthèse des calculs sur les indices foliaires 52
Tableau 16 : Matrice de corrélation de Pearson entre les indicateurs de canopée 52

ABREVIATIONS

°J : Degré jour
%MS : Pourcentage de Matière Sèche
ADN : Acide Desoxyribonucléique
Al : Aluminium
ANOVA : Analysis of Variance
AOP : Appellation d'Origine Protégée
ATP : Adénosine triphosphate
BFS : Boutons Floraux Séparés
CEC : Capacité d'Echange Cationique
CIVOVI : Cabinet d'Ingénieur Conseil en Viticulture
CO2 : Dioxyde de carbone
Fe : Fer
ICP-AES : Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
VSIG : Vin Sans Indication Géographique
IGP : Indication Géographique Protégée
AOP : Appellation d'Origine Protégée
IRTF : Infra-Rouge à Transformée de Fourier
FG : Fermeture de Grappe
FLO : Floraison
LAI : Leaf Area Index
LUV : Limite Usuelle de Variation
Mg : Magnésium
MO : Matière Organique
MS : Masse Sèche
N : Azote
Nass : Azote Assimilable
NO3- : Ions nitrates
NH4+ : Ions ammoniums
NOU : Nouaison
NR : Nitrate Réductase
P : Phosphore
PG : porte-greffe
pH : Potentiel Hydrogène
SRDV : Société de Recherche et Développement en Viticulture
TAV : Titre Alcoométrique Volumique
TP : Taille de Pois
VER : Véraison

Impact de l'enherbement et du travail du sol sur l'assimilation des éléments minéraux par la plante

Partie 1 INTRODUCTION

Le Languedoc, plus gros bassin viticole français (FranceAgriMer, 2018), a connu des mutations importantes depuis une trentaine d'années. La fin de la rémunération au « kilo-degré », les primes à l'arrachage, la limitation des rendements en appellation, la restructuration variétale *etc*. illustrent les modifications profondes entreprises dans la région. Aujourd'hui, les objectifs et les défis sont multiples : changement climatique, adaptation aux marchés nationaux et internationaux, baisse généralisée des rendements, dégradation des sols… L'adaptation et les réponses à ces défis passeront principalement par l'actionnement de leviers viticoles.

Une fertilisation raisonnée et efficiente fait partie de ces leviers. C'est une dimension essentielle du maintien de la pérennité d'un vignoble et de l'obtention d'un vin de qualité. Satisfaire les besoins physiologiques de la vigne est essentiel pour répondre aux objectifs de production actuels et futurs.

L'enherbement est un autre levier. C'est un outil de gestion durable de la fertilité et du maintien des sols. Cependant sa mise en place et sa gestion demande une certaine expertise et son éventuel impact négatif sur le rendement, paramètre décisif de rentabilité, limite son adoption par la filière, notamment en régions méridionales.

C'est dans ce contexte que plusieurs structures de la filière languedocienne ont fondé la Société de Recherche et Développement Viticole (SRDV). Son objectif est d'initier et d'accompagner des réflexions nouvelles en matière viticole au travers d'outils d'aides à la décision performants. Elle s'appuie pour cela sur un cortège d'analyses : pétiolaire, sarment, sol, engrais. Reflets de la dynamique d'absorption minérale de la vigne et des éventuels déséquilibres, ces outils de diagnostic permettent de piloter les pratiques viticoles vers un équilibre physiologique satisfaisant. Ceci dans une approche agro-œnologique qui fait le lien entre viticulture et équilibre des vins.

L'assimilation minérale de la vigne est au cœur de la démarche de la SRDV. Elle est complexe et plusieurs facteurs biotiques et abiotiques entrent en jeu. L'enherbement, via son impact sur les propriétés du sol, peut modifier cette assimilation. Il convient donc d'étudier cet impact aux travers d'essais pour nuancer les analyses et les conseils en fonction des stratégies culturales et du millésime.

Le présent mémoire s'articule donc autour de quatre grandes parties. Premièrement, le contexte et une synthèse bibliographique, faisant état des connaissances sur la nutrition de la vigne et l'impact de l'enherbement, permettront de formuler une problématique.

La seconde partie portera sur l'établissement d'une méthodologie permettant de qualifier l'impact de l'enherbement sur la physiologie de la vigne.

Ensuite viendront les résultats sur les dynamiques d'assimilation minérale, le régime hydrique et leurs interprétations.

Enfin, discussions et perspectives clôtureront ce mémoire.

Figure 1 : Couvert végétal sur l’inter-rang, parcelle expérimentale au sud de Narbonne (source personnelle)

Partie 2 CONTEXTE, ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

2.1 L'enherbement en viticulture

Les sols viticoles sont parmi les plus dégradés à cause du labour répété qui favorise l'érosion et la minéralisation du carbone organique (Komárek et al., 2010; Martínez-Casasnovas and Sánchez-Bosch, 2000). Or, ils sont un facteur clé du terroir viticole (Van Leeuwen et al., 2018). Face à ce constat, une certaine prise de conscience voit émerger des pratiques culturales favorisant la conservation des sols, comme les couverts végétaux.

Un **couvert végétal** (exemple *figure 1*) est une culture visant à fournir des services écosystémiques non-marchand (SSSA, 2008). Sa mise en place s'inscrit dans la démarche actuelle d'agriculture de conservation des sols. En effet, *« une gestion performante de la fertilisation des sols viticoles s'appuie en premier lieu sur la préservation de la fertilité et l'entretien des fonctionnalités naturelles des sols »* (Lempereur et al., 2017).

La réduction du travail du sol, la mise en place d'un couvert et son incorporation ont fait leur preuve comme mesures efficaces de conservation et de restauration d'un sol.

Principalement via une augmentation de la MOS, une réduction de l'érosion et en préservant la fertilité biologique des sols (Lal, 2015). Plusieurs services et/ou dysservices agronomiques peuvent ainsi être attendus d'un enherbement (Garcia et al., 2018).

La **date** et le **mode** de **destruction du couvert** (stratégie d'entretien) sont déterminants. Ils conditionnent en effet les services/dysservices obtenus.

Par ailleurs, dans un contexte réglementaire incertain, l'enherbement et le travail du sol peuvent se présenter comme des alternatives sérieuses au désherbage chimique en évitant le salissement.

- L'enherbement est une pratique agronomique qui permet la restitution progressive des potentialités du sol. Ce faisant, il fournit un ensemble de services agronomiques bénéfiques à l'équilibre nutritionnelle de la plante. Mais, sans gestion adaptative, il peut être source de dysservices et impacter négativement la nutrition minérale de la vigne.

2.2 Synthèse bibliographique : l'alimentation minérale de la vigne et l'enherbement

Cette synthèse aborde dans un premier temps la physiologie de la vigne, plus précisément les mécanismes de sa nutrition minérale au cours du cycle végétatif. Dans un second temps, l'examen de l'ensemble des facteurs d'influences qui régissent cette nutrition permet finalement de s'intéresser à l'influence de l'enherbement.

a) La nutrition minérale de la vigne

- **Besoins**

Selon (Champagnol, 1984), dix-sept éléments sont essentiels au fonctionnement d'une plante et sont puisés dans le sol. Leur concentration et transport dans la plante sont finement régulés par l'homéostasie[1]. Son maintien conduit à différents mécanismes de régulation dans le continuum sol-plante à travers les processus d'assimilation et de translocation (Marschner, 2011). Trois éléments organique, le Carbone (C), l'Oxygène (O) et l'Hydrogène (H) représentent plus de 90% des résidus secs (Delas, 2000).

[1]Processus de régulation par lequel l'organisme maintient les différentes constantes du milieu intérieur entre les limites des valeurs normales. (Larousse)

Tableau 1 : Prélèvements et rôles des éléments minéraux chez la vigne, synthèse bibliographique d'après (Champagnol, 1984; Couderc, 2015; Crespy, 2003; Delas, 2000; Dubernet et al., 2015; Gobat et al., 2010; Reynier, 2012)

Eléments	Prélèvements annuels	Rôle physiologique et œnologique	Formes dans le sol et formes d'assimilation
Azote (N)	20 à 70 kg	Protéosynthèse, photosynthèse (RubisCo), métabolisme : *Base structurelle de la chlorophylle, des acides aminés, des messagers hormonaux* Fermentescibilité du moût (azote assimilable), résistance à l'oxydation	N_2 : azote élémentaire, requiert une fixation NO_3^- (facilement lixivié) plus rarement NH_4^+
Potassium (K)	25 à 70 kg	Rôle physiologique majeur : *Translocation membranaire (accumulation des sucres not.), transport des assimilats, équilibrage osmotique, assimilation minérale (ouverture stomatique), neutralisation des acides organiques ; risque de maturité explosive* Conséquences œnologiques majeures par son action sur le pH : *Perte d'acidité, déséquilibre organoleptique, fragilité microbiologique, précipitation tartrique*	Constituant des silicates : 95% du K d'un sol Rétrogradé dans les argiles K^+ libre et assimilable dans la solution du sol
Phosphore (P)	3 à 10 kg	Croissance, développement racinaire : *Régulateur de développement, base de l'ATP (métabolisme énergétique), action conjuguée à l'azote*	HPO_4^{2-} en contexte basique Difficilement absorbable
Calcium (Ca)	40 à 80 kg	Rôle structurel majeur, meilleur résistance aux agressions extérieures : *Résistance des tissus, pouvoir tampon intracellulaire*	Ca^{2+} Abondant sous forme de carbonates Echangeable sur le complexe adsorbant
Magnésium (Mg)	6 à 15 kg	Composition de la chlorophylle, balance ionique intracellulaire, protéosynthèse Diminution du risque de précipitation tartrique	Mg^{2+}
Fer (Fe)	600 g	Synthèse de la chlorophylle, rôle cruciale dans les processus de respiration et de photosynthèse, évite la chlorose Casse ferrique	Forme ferrique (Fe^{3+}) et ferreuse (Fe^{2+}) Chélaté à la MO
Bore (B)	80 à 150 g	Rôle majeur dans les phénomènes de fécondation et de nouaison (cycle sexué) *Risque de coulure en cas de carence*	Constituant des silicates
Cuivre (Cu)	60 à 120 g	Cofacteur d'enzymes du cycle respiratoire et de la protéosynthèse	Chélaté à la MO
Manganèse (Mn)	80 à 160 g	Cofacteur d'enzymes impliquées dans le cycle respiratoire Risque de toxicité en condition anoxiques	Semblable au Fe
Zinc (Zn)	100 à 200 g	Impliqué dans la synthèse de protéines d'acides nucléiques	Très peu de Zn^{2+} en solution

Ils sont notamment essentiels à la photosynthèse et fournis *via* l'atmosphère et le sol (CO_2 et H_2O). Les 14 autres éléments se divisent en deux catégories : les macroéléments et les microéléments.

On compte dans les premiers l'Azote, le Phosphore, le Potassium, la Calcium, le Magnésium et le Soufre. Et parmi les seconds le Fer, le Bore, le Cuivre, le Manganèse, le Molybdène et le Zinc.

D'après (Delas, 2000; Reynier, 2012), les quantités d'éléments minéraux prélevés par les souches pour fabriquer les bois, les feuilles, le grossissement des parties pérennes et assurer la production varient dans les limites présentées dans le *tableau 1*. Ce dernier synthétise aussi les rôles des différents éléments minéraux chez la vigne.

L'excès ou l'insuffisance d'un élément entraîne des troubles physiologiques. La satisfaction de ces besoins est par conséquent essentielle au maintien du potentiel agronomique de la vigne et du sol (Reynier, 2012, p. 320).

- **Mécanismes et dynamique de la nutrition**

La composition minérale varie cours du cycle en fonction des stades et des besoins : en début de cycle, les réserves assurent la redistribution des éléments minéraux, puis, une fois opérationnel, le système racinaire absorbe les éléments minéraux dissous sous forme ionique dans la solution du sol. A maturation, les feuilles adultes et les sarments élaborent et accumulent des métabolites qui migrent vers les organes en croissance ou les parties vivaces (Reynier, 2012).

Les racines prélèvent l'eau et les éléments minéraux dont la plante a besoin par leurs poils absorbants, en contact avec la solution du sol. La diffusion de l'eau et des ions se fait par des mécanismes *passifs* et *actifs*.

La phase d'absorption *passive* répond au principe de l'osmose et du différentiel de potentiel entre la solution du sol et la cellule racinaire.

Le pompage *actif* résulte de l'énergie libérée au cours de la respiration. L'intensité de cette phase dépend de la température, de la teneur en O_2 et de l'importance des réserves organiques (Reynier, 2012). Le mouvement ascendant de la sève brute, composée d'ions minéraux, d'eau, d'azote et de composés organiques, est dû en début de cycle à la poussée racinaire jusqu'à ce que la *transpiration* des feuilles soit suffisante pour être moteur de la nutrition.

La **réserve utile** du sol, en mettant en solution les ions, et la **demande évaporative**, en régissant la montée de sève, sont des paramètres clés de la nutrition minérale de la vigne. Des conditions asphyxiantes, un asséchement du sol ou la fermeture des stomates ralentissent voire arrêtent la conduction et sont par conséquent préjudiciables (Reynier, 2012).
Les dynamiques d'absorption des principaux nutriments ont été décrit par (Conradie, 1981, 1980) et sont résumés figures 2 et 3.

Dynamique de l'azote :

L'assimilation de l'azote se fait sous deux formes ioniques : nitrates (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+). Le reste de la fraction azotée du sol est intégrée de manière réversible à la MO sous forme non assimilable et libérée par le processus de **minéralisation** (Morot-Gaudry, 1997). Il peut aussi être perdu par dénitrification.

Deux pics d'absorption se distinguent. Le premier commence après le débourrement, s'intensifie à la floraison et pendant la croissance rapide des rameaux. La seconde phase dure de la véraison jusqu'à la chute des feuilles (*figure 3*). Cette deuxième phase représente seulement 34% de l'assimilation totale de la saison.

La contrainte hydrique en conditions estivales limite la mobilité de NO_3^- en asséchant les sols. Cette assimilation est principalement stockée dans les racines. (Conradie, 1980). La fenêtre d'assimilation printanière, plus importante, est donc déterminante. Elle conditionne le développement du **système foliaire** et de la **photosynthèse** (l'Azote est un composé structurant majeur de la *RuBisCO,* enzyme de la photosynthèse). L'assimilation lors de cette phase assure donc le basculement vers **l'autotrophie**. Avec le phosphore, elle conditionne aussi la croissance racinaire, dont dépendra l'absorption hydrique et minérale (Dubernet et al., 2015). Plus tard dans le cycle, l'assimilation de l'azote participe au **grossissement** des baies et ensuite au bon déroulement des fermentations via les niveaux d'azote assimilable.

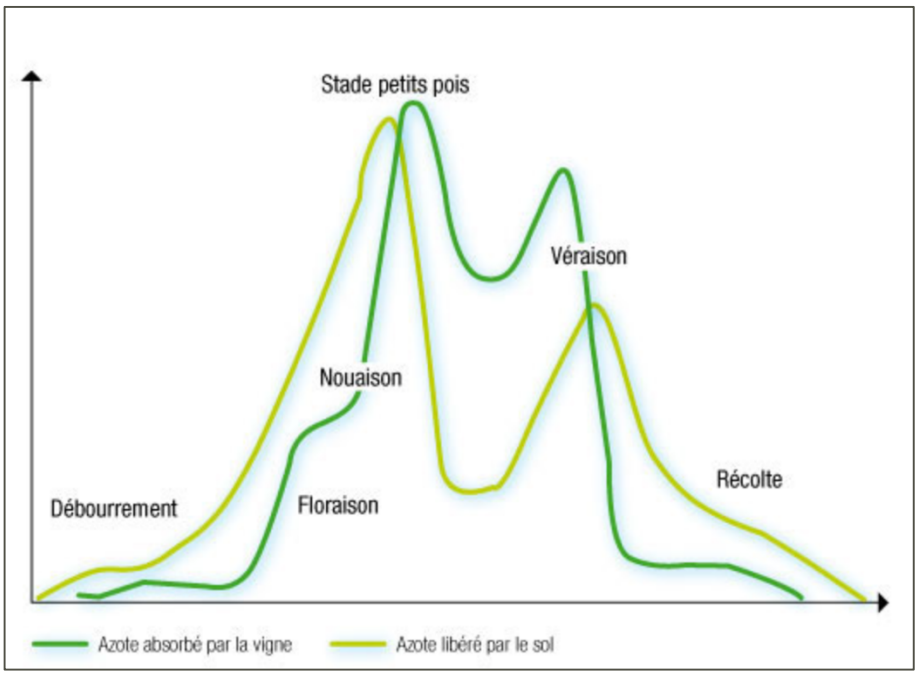


Figure 2 : Rythme d'absorption de l'azote par la vigne et sa libération par le sol (Conradie, 1980) © UNIFA

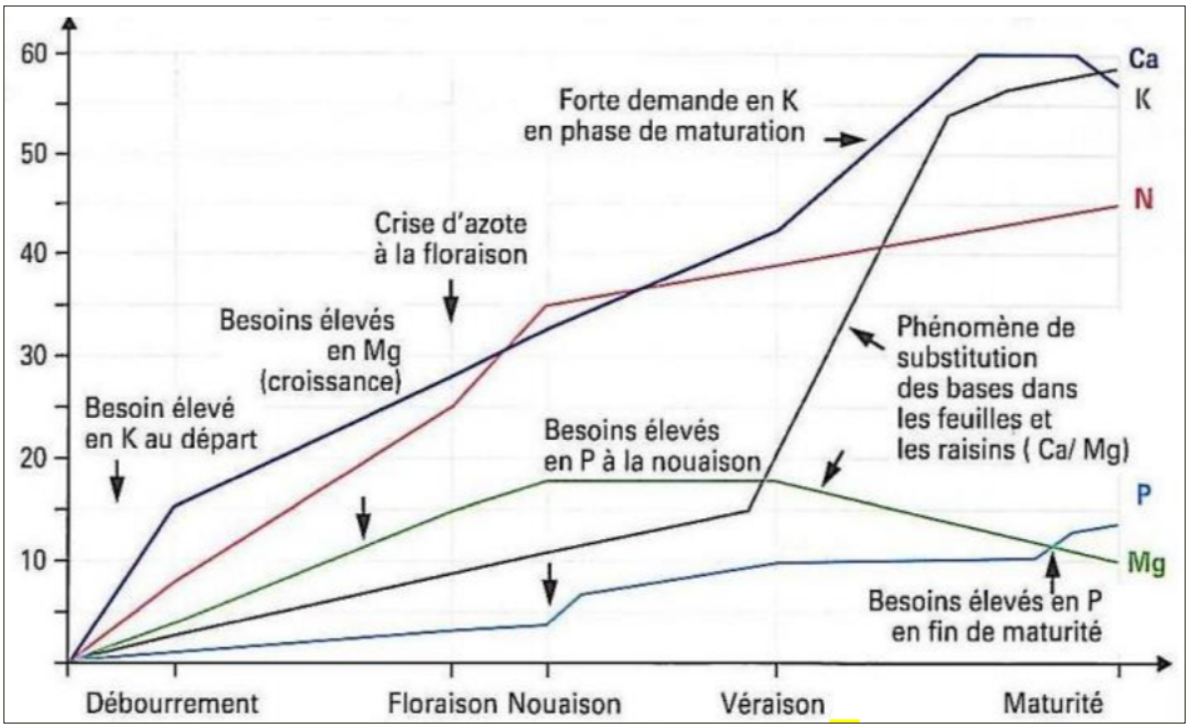


Figure 3 : Rythme d'absorption des éléments au cours du cycle végétatif (Conradie, 1981, 1980)

Autres macroéléments (P, K, Ca et Mg) :

Comme pour l'Azote, la nutrition en macroéléments est assurée par les structures pérennes jusqu'à la phase autotrophe où l'absorption racinaire prend le relais. Une bonne assimilation en N et P au printemps induisent une croissance racinaire et conditionne donc l'assimilation des autres minéraux (Dubernet et al., 2015)

- L'absorption du Phosphore se déroule aussi en deux pics distincts. Un premier du débourrement jusqu'à la véraison, avec un pic à la nouaison puis un second moins important en fin de maturité et post-récolte. Le phosphore est indispensable à **l'induction racinaire** et au **fonctionnement énergétique** des vignes.
- La demande en Potassium débute 3 semaines post-débourrement puis devient très élevée en phase de maturation. Dès lors, il intervient dans la **migration et l'accumulation des sucres** dans la baie par la voie du phloème (Mpelasoka et al., 2003; Reynier, 2012).
- L'absorption de Calcium est active du débourrement jusqu'à véraison puis devient moins prononcée jusqu'à six semaines avant la chute des feuilles. Il intervient dans la **résistance** des pellicules.
- La dynamique du Magnésium est similaire jusqu'à véraison puis décroit progressivement jusqu'à se stopper à la chute des feuilles. Il est essentiel à la photosynthèse.

Après la récolte, un dernier pic d'absorption s'opère pour tous les éléments minéraux afin de constituer des réserves par leur accumulation dans les parties vivaces.

Interaction entre les minéraux :

L'absorption d'un élément est susceptible de subir un antagonisme ou de bénéficier d'une synergie avec un ou d'autres éléments. Le Potassium limite par exemple l'absorption du Magnésium et inversement (Reynier, 2012). C'est d'ailleurs un paramètre très surveillé dans l'analyse pétiolaire pour ajuster la fertilisation. Le *tableau 2* fait état de ces différentes interactions.

b) Facteurs d'influence de la nutrition minérale

Le continuum sol-plante-atmosphère soumet la nutrition minérale de la vigne a différents facteurs de nature abiotique et biotique.

- **Le sol**

Le sol joue un rôle clé dans l'alimentation de la vigne en assurant le bon déroulement des cycles biogéochimiques des nutriments (Vaudour et al., 2015). Il fournit à la vigne eau et éléments minéraux, et conditionne *a fortiori* sa vigueur, son rendement et la qualité de ses baies (White, 2006).

Le sol est le support d'implantation de la culture. En s'enracinant, la vigne explore l'ensemble du volume de sol disponible. Sa profondeur est donc déterminante dans l'assimilation minérale.

Disponibilité des éléments :

La transition d'éléments de l'état primaire à l'état **biodisponible** est principalement fonction des conditions pédoclimatiques mais aussi des prélèvements et restitutions des organismes du système et d'apports externes (engrais, amendements…).

Les éléments transitent d'un compartiment du sol à un autre par les phénomènes de **minéralisation**, **d'humification**, de **fixation biologique**, de décomposition d'organismes morts, d'altération de la lithosphère… Les voies d'importations et d'exportations, la taille relative de chaque compartiment ainsi que la répartition et la transition entre ces compartiments est propre à chaque élément (White, 2006).

La distribution verticale des éléments minéraux est propre à leur mobilité et à leur origine : la dégradation de la roche mère libère des éléments en profondeur. A l'inverse, les entrées atmosphériques augmentent les réserves en surface.

Pour l'Azote, les accumulations se font toujours dans l'horizon de surface riche en MO, et la teneur diminue avec la profondeur. Mais les nitrates (NO_3^-), très mobiles, peuvent être lixiviés et s'accumuler en profondeur. La distribution spatiale du Phosphore et du Potassium est plus différenciée du fait d'une mobilité plus modérée (White, 2006).

Tableau 2 : Antagonismes et synergie des éléments minéraux (Champagnol, 1984) ©Couderc

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	B
N		+	-		-	-		-	-	
P			-	-	+		-		-	
K				-	-	-				-
Ca					-	-	-		-	-
Mg						-				
Mn							-	-	-	
Fe								-	-	-
Cu										
Zn										
B										

- Défavorable à l'absorption
+ Favorable à l'absorption

Matière organique et fraction minérale :

La Matière Organique (MO), ensemble de substances et composés carbonés issus de la dégradation de résidus animaux et végétaux, joue un rôle majeur dans la nutrition de la vigne. En effet, elle assure le **stockage** et la **mise à disposition par minéralisation** des éléments nécessaires à la plante. Plus il y a de matière organique en circulation dans le sol et d'activité biologique, moins la fertilisation exogène est nécessaire.

Certaines molécules non-minéralisées subissent une réorganisation complexe en substances humiques qui, fixées au particules d'argiles, garantissent la pérennité structurale du sol et donc sa résistance aux dégradations (IFV, 2020a). Le taux de MO en sols viticole est généralement compris entre 0,5 et 2%. Un taux inférieur à 1% peut être problématique (IFV, 2020a).

Les argiles granulométriques s'associent à la MO pour former, sous l'action stabilisatrice du Calcium, le **complexe argilo-humique (CAH).** Ces colloïdes participent à la structuration du sol en améliorant la circulation et le stockage de l'eau et la redistribution des éléments minéraux. La structure en feuillet des argiles confère au CAH une puissante charge négative qui attire les nombreux cations libres de la solution du sol. Cette « plaque tournante » entre végétation (MO), eau (solution du sol) et roche (argiles issus de l'altération) est par conséquent un réservoir d'éléments nutritifs (Gobat et al., 2010).

Les cations retenus sur les colloïdes du sol peuvent être remplacés par d'autres cations. Cela signifie qu'ils sont échangeables. La **capacité d'échange cationique (CEC)** fait référence à cette capacité du sol à retenir et échanger des éléments nutritifs facilement disponibles pour les plantes (Gobat et al., 2010).

Les **racines accèdent à cette faible proportion de la fraction minérale**. Celle-ci est constituée, comme vu ci-dessus, d'un *pool* d'ions dissous dans la solution du sol et d'ions échangeables adsorbés dans le CAH. Le reste de la fraction minérale comprend des composés peu solubles (calcite, magnésite), insolubles (P, Cu, Fe, Zn, Mn, Mo) et non-échangeables (White, 2006).

pH :

La baisse ou l'augmentation du pH, particulièrement dans les extrêmes, met en solution de nombreux ions qui peuvent alors s'avérer toxiques (Gobat et al., 2010). Dans le Languedoc, les sols généralement **basiques** rendent le **Fer, le Manganèse** ou le Bore moins disponibles.

- Maintenir le sol dans de bonnes conditions physiques (structure, texture), chimiques (nutrition adéquate, absence de toxicités) et biologiques (minéralisation et biodiversité, MO) est important pour maintenir le rendement et la longévité de la plante (White, 2006). La compréhension des mécanismes complexes impliqués dans le transfert des éléments minéraux du sol vers la grappe reste incomplète. Mais il y a un intérêt grandissant pour appréhender les effets de la nutrition sur les vins (Vaudour et al., 2015). Cet intérêt pour l'agro-œnologie est partagé au sein de la SRDV et des laboratoires Dubernet.

- Les autres composants du « terroir », principalement les paramètres météorologiques, rendent donc difficile l'isolation de l'influence du « sol » seule.

- **Facteurs climatiques**

Les influences du climat sur la nutrition sont multiples. De nombreux facteurs climatiques (température, précipitations, radiations, vent, humidité) influencent ainsi le fonctionnement du sol (Gobat et al., 2010) et la demande évaporative (Jensen and Haise, 1963). L'impact sur la maturation du raisin a aussi été largement étudié (Deloire et al., 2006, 2004; Gaudin et al., 2014; Leeuwen et al., 2009; Ojeda et al., 2002).

L'eau disponible pour la plante varie en fonction des précipitations. L'évapotranspiration est responsable des pertes hydriques. Le drainage ou le couvert végétal modulent ces pertes (Deloire et al., 2004).

L'évapotranspiration résulte entre autres de l'humidité et de la température du sol, du contexte thermohygrométrique, du vent, de la pression atmosphérique et des radiations solaires (Monteith, 1965; Penman and Keen, 1948). Or, comme vu précédemment, la *demande évaporative* est moteur de l'assimilation minérale dans le flux sol-plante-atmosphère.

La vigne entame sa croissance au-dessus d'un certain seuil de température appelé *zéro de végétation*. Il est d'environ 10°C (Branas et al., 1946).

La phénologie de la vigne et la maturation du raisin dépendent aussi fortement de l'état hydrique de la vigne. Un déficit hydrique modéré augmente le potentiel qualitatif de raisins noirs. En revanche, un stress hydrique excessif est préjudiciable. Ce dernier peut être corrigé *via* l'irrigation, mais les apports d'eau ne doivent pas annuler le déficit hydrique. (Leeuwen et al., 2009)

La dynamique des apports d'eau conditionne le niveau d'absorption des éléments. Pour l'Azote par exemple, la conjonction des paramètres humidité et température dans le sol, autorisant le fonctionnement biologique du sol et la minéralisation de l'humus, se produit en période printanière. Le flux d'azote pétiolaire est alors à son maximum (Dubernet et al., 2015). L'assimilation printanière est très dépendante des conditions climatiques (*figure 4)*. En conditions asséchantes, asphyxiantes ou froides, le fonctionnement du sol et l'assimilation des éléments sont perturbés (Gobat et al., 2010).

- **Matériel végétal**

Ce facteur exerce son influence sur l'assimilation minérale *via* l'exploration racinaire, la demande évaporative et les facteurs génétiques.

Le couple cépage/porte-greffe est déterminant : il doit être adapté au sol pour éviter toute carences comme la chlorose ferrique en milieu calcaire (Galet, 1998) mais aussi aux conditions climatiques. Les principaux PG ont été classés en fonction de leur tolérance à la sécheresse (Carbonneau, 1985). Un PG à la capacité d'influencer la fourniture en eau et en nutriments du greffon (Silva, 2002). Des différences d'absorption significatives ont été relevées, chez les PG comme chez les cépages, pour l'Azote, le Phosphore, le Potassium, le Calcium et le Magnésium (Crespy, 2003; Delas and Pouget, 1979). Chaque couple cépage/PG a donc un équilibre nutritionnel qui lui est particulier.

La densité de plantation détermine le volume explorable par plante (Reynier, 2012; White, 2006). Sa diminution est envisageable pour limiter le déficit hydrique (Van Leeuwen et al., 2019).

- **Conduite culturale**

Le système de conduite influence l'assimilation minérale (rognage, relation organes sources/puits, surface foliaire et demande évaporative…).

c) Enherbement et travail du sol

Les *figures 5 et 6*, récapitulent les services et les dysservices pouvant être attendus d'un enherbement. Ceux en lien avec la nutrition minérale sont détaillés dans cette partie.

Les couverts végétaux affectent la dynamique et l'équilibre des nutriments (Blanco-Canqui et al., 2015; Garcia et al., 2018). En effet, ils :

- Fixent l'N_2 atmosphérique ainsi que les éléments et en capture en profondeur
- Se décomposent post-destruction (restitution minérale, augmentation du taux de MO)
- Atténuent l'érosion par l'eau et par le vent

➢ Inclure des couverts végétaux dans le système de culture peut donc affecter **l'accumulation**, le **stock** et le **cycle** des nutriments d'un sol.

- **Mise en place d'un couvert végétal**

Le vigneron dispose de plusieurs leviers pour arriver à un ou des objectifs (augmentation de la MO, baisse de la vigueur…) dans un contexte pédoclimatique donné. Parmi eux :

- le choix des espèces (intensité de la concurrence hydrique et azotée, fourniture d'N importante avec les légumineuses… cf. *annexe 1* pour quelques caractéristiques majeures),
- la distribution spatiale (tous les inter-rangs, un sur deux, sous le rang…),
- la date d'installation (date de semis en général proche de la date de vendange),
- le maintien du couvert et le mode de de destruction (couvert permanent ou temporaire)

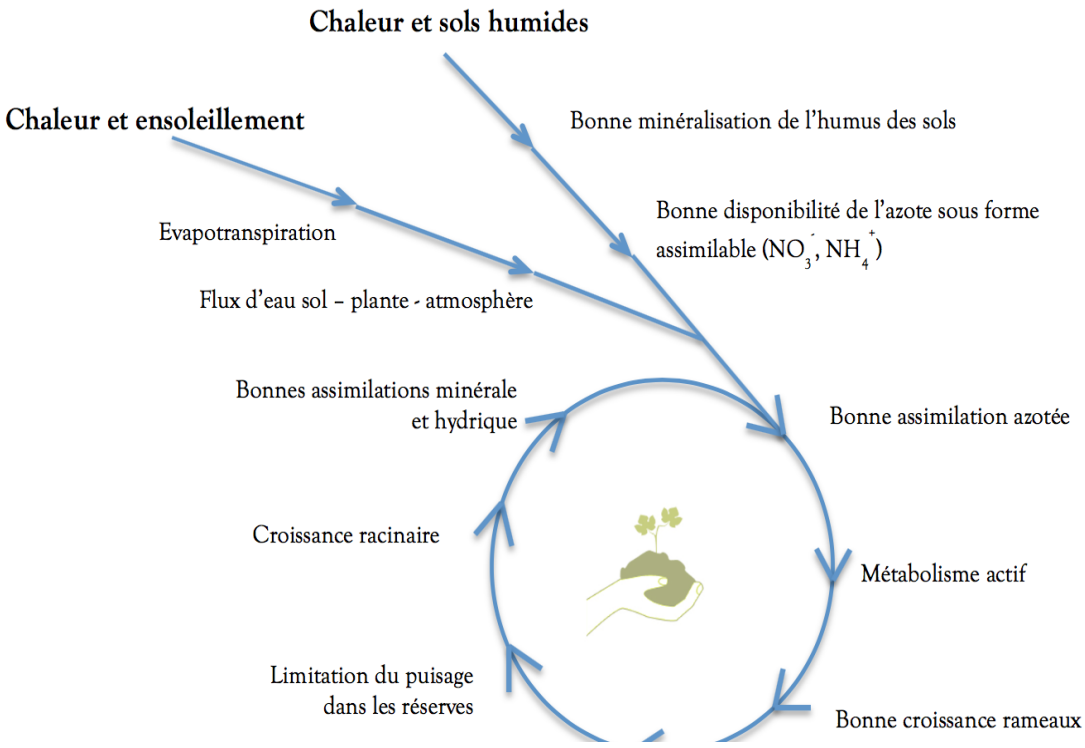


Figure 4 : Schéma explicatif du lien entre assimilation azotée et conditions climatiques en situation de printemps favorable (Dubernet et al., 2015).

Une gestion adaptative en fonction des conditions climatiques observées et du développement du couvert durant le millésime est essentielle pour arriver à terme aux objectifs poursuivis (Garcia et al., 2018). Cette stratégie va notamment conditionner la concurrence hydro-azotée (Delpuech and Metay, 2018).

- **Conséquences sur les ressources hydriques et minérales**

Les couverts améliorent certaines propriétés du sol (texture, porosité, structure, régime hydrique, fertilité minérale du sol) qui, comme étudié précédemment, sont des facteurs clés de la nutrition.

Ressource hydrique

L'enherbement stabilise les agrégats du sol (Goulet et al., 2006) et participe au maintien de la structure et de la macroporosité (Ferrero et al., 2005).

En en limitant le tassement et grâce au support du système racinaire, ils atténuent l'érosion de 40 à 96% et les pertes par ruissellement jusqu'à 40% (Blanco-Canqui et al., 2015; Kirkby et al., 2000). Ce faisant, ils évitent la perte d'une précieuse somme de nutriments présents en surface.

Le couvert végétal protecteur diminue l'énergie cinétique des goutte de pluies et améliore l'infiltration lors d'épisodes pluvieux (Wassenaar et al., 2005).

Grâce à l'augmentation de la macroporosités par le système racinaire (Leonard and Andrieux, 1998), l'enherbement améliore la circulation de l'eau et de l'air, et augmente la recharge en eau hivernale des sols (Gaudin et al., 2010). La capacité de rétention étant par ailleurs augmentée (Morlat and Jacquet, 2003) et l'infiltration de l'eau améliorée, ceci est particulièrement intéressant en climat méditerranéen où l'été est sec et la pluie répartie en automne-hiver.

Toutefois, cette recharge hivernale ne compense que partiellement la compétition hydrique entre la vigne et le couvert sur l'inter-rang (Celette et al., 2008).

En effet, le couvert est consommateur d'eau puisqu'il transpire de façon permanente afin d'assurer la production de biomasse et la survie de la plante (Thomas and Archambeaud, 2013). Or cette consommation d'eau débute avant le débourrement et l'horizon exploré par le couvert s'assèche. Ce décalage dans le timing d'absorption conduit la vigne à redistribuer son système racinaire en profondeur. Il y a ainsi distinction spatiale des zones d'exploration par les systèmes racinaires des deux espèces (Celette et al., 2008). Mais malgré cette complémentarité spatiale dans la distribution racinaire, le couvert limite la quantité d'eau disponible pour la vigne (Celette et al., 2005).

Ceci explique le niveau d'adoption relativement faible des couverts en situation méditerranéenne, où l'impact sur la vigueur et le rendement lié à la compétition pour l'eau et l'azote entre la vigne et le couvert (Celette et al., 2009) sont les plus redoutés par les vignerons (Frey, 2016).

Dans ces conditions, adapter la date de destruction aux conditions climatiques du millésime et ne couvrir qu'un inter-rang sur deux permettrait de trouver un compromis. Autrement dit d'éviter cette concurrence préjudiciable tout en fournissant des services écosystémiques (Delpuech and Metay, 2018).

Une fois le couvert détruit, la présence d'un *mulch*[2] modifie aussi la dynamique de l'eau en limitant les pertes par évapotranspiration (Unger and Vigil, 1998) et le ruissellement (Prosdocimi et al., 2016).

L'enherbement peut affecter la quantité de nutriments et de MO (Fourie, 2012). Ils apportent de la matière organique et stimulent l'activité biologique du sol. Les quantités d'humus formé permettent d'entretenir le taux de matière organique. En augmentant ce taux de MO, ils améliorent la capacité de stockage et de restitution d'éléments minéraux (Gontier, 2020).

Impact sur la dynamique de l'azote

Le cycle de l'Azote est modifié par la présence d'un enherbement qui en prélève pour sa croissance.

[2] Déchets de tonte, pailles *etc*. issus de la destruction du couvert et qui restent sur place. Il forme une couche superficielle

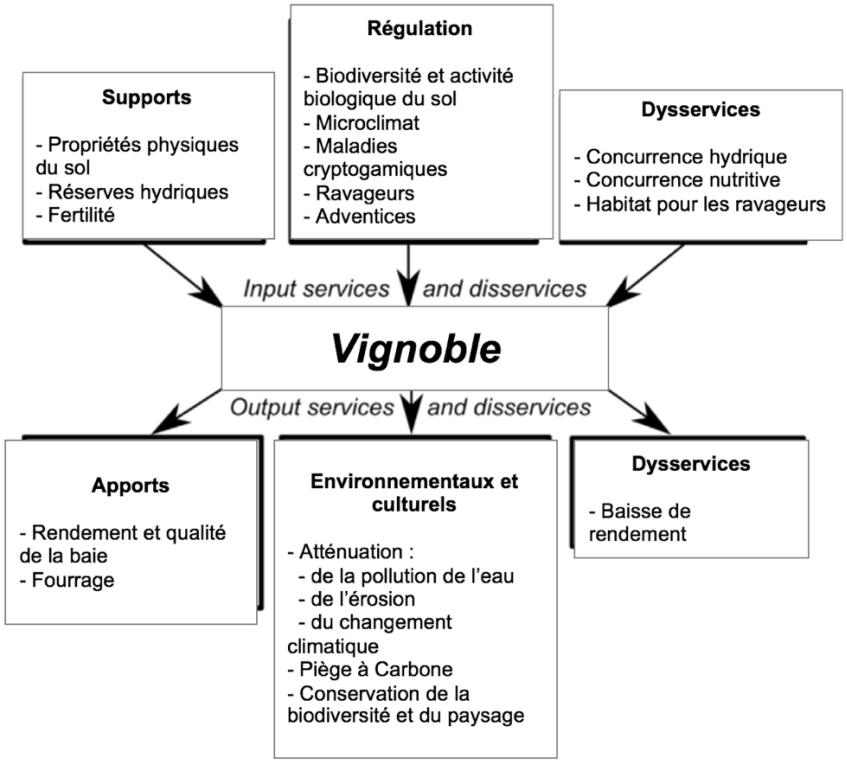


Figure 5 : Services et dysservices d'un enherbement (adapté de (Garcia et al., 2018)).

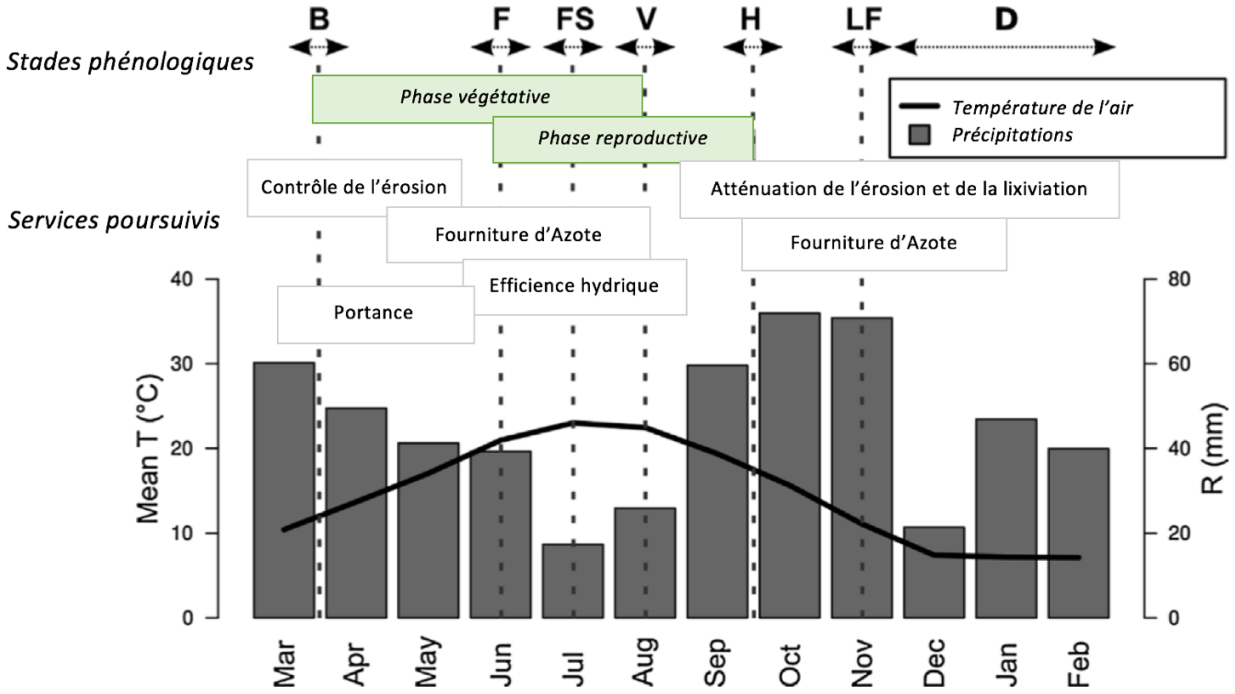


Figure 6 : Temporalité des services attendus d'un couvert végétal (adapté de (Garcia et al., 2018)).

En haut les stades phénologiques (B : Débourrement ; F : Floraison ; FS : Nouaison ; V : Véraison ; H : Récolte ; LF : Chute des feuilles ; D : Dormance)

Au milieu les services attendus en fonction de la période. Certains services généraux comme l'augmentation de la MO sont constants dans l'année.

En bas les données climatiques moyennes en situation Méditerranéenne, période 2005-2015, station de Roujan, (Mean T : Température Moyenne et R : précipitations)

Le couvert, plus précoce, piège de l'Azote avant la vigne pour sa croissance et ne le restitue par minéralisation qu'après destruction (Thorup-Kristensen et al., 2003). En plus d'immobiliser et de rendre indisponible cet Azote, le couvert transpire et assèche le sol. Ce faisant il limite la minéralisation, source principale d'azote inorganique (Celette et al., 2009). Or cette compétition peut se faire en phase critique comme la floraison ou la nouaison, et ainsi impacter le rendement de l'année suivante.

Les racines, en plongeant plus profondément, abandonnent partiellement cette zone superficielle de minéralisation (Celette et al., 2009). La destruction du couvert est censée stopper les pertes par transpiration et ainsi préserver la ressource hydrique. (Garcia et al., 2018)

Mais le couvert peut aussi avoir un impact positif sur la dynamique de l'Azote en modifiant certains termes du bilan azoté. Après destruction, il en restitue une certaine quantité, fonction du ratio C/N[3], de la biomasse produite (Finney et al., 2016; Vrignon-Brenas et al., 2016). Cette restitution se fait par décomposition puis minéralisation. Deux périodes d'assimilation de cet Azote ont été identifiées par (Patrick et al., 2004) : de 4 à 6 semaines et de 16 à 20 semaines après une incorporation en avril. Soit au plus fort de la demande printanière et à nouaison.

Les couverts valorisent la minéralisation automnale (Thomas and Archambeaud, 2013). A cette période, le risque de lessivage est important sur sol nu. Certaines espèces limitent fortement ces pertes en capturant les nitrates (Thorup-Kristensen et al., 2003).

La fourniture en Azote est aussi dépendante des espèces implantées dans le couvert. Les légumineuses (*fabacées*) présentent un potentiel de fourniture significativement supérieur aux autres espèces (Gontier, 2015; Ingels et al., 2005). Ceci grâce à leur capacité à fixer l'Azote atmosphérique (N_2). Les légumineuses généralement implantées en viticulture sont capables de fixer entre 40 et 60 kg_N/ha (White, 2006).

En diversifiant les espèces implantées, il est donc possible de combiner plusieurs services relatifs à l'Azote (engrais verts, piège à nitrates…).

Impact sur les autres éléments minéraux

Le couvert prélève et immobilise d'autres composés nécessaires à sa croissance, puis les restitue en se décomposant. Il ne modifie donc pas seulement le cycle biogéochimique de l'Azote mais également celui d'autres éléments.

A ce jour, les niveaux de prélèvement d'N, P et K ont été mesurés en serre chez certaines espèces communes (Atallah and Lopez-Real, 1991; Gardner and Boundy, 1983), mais la minéralisation et l'assimilation en conditions réelles est peu documentée (Garcia et al., 2018).

En modifiant la dynamique de l'eau et la minéralisation, l'enherbement a un impact sur la biodisponibilité de tous les ions dans la solution du sol.

En profitant de la minéralisation automnale, il recycle une certaine quantité de nutriments autrement lixiviés sur sol nu. La juxtaposition de plusieurs espèces aux profils racinaires différents permet d'optimiser la mobilisation de l'ensemble des réserves du sol (Boutin, 2003).

Certaines espèces utilisent les éléments minéraux sous forme insoluble alors qu'ils sont inutilisables tel quel par la vigne. C'est le cas par exemple des Crucifères avec la potasse (Boutin, 2003). Ces éléments s'accumulent dans la plante et sont ainsi restitués à la vigne sous forme assimilable après destruction. Ils prélèvent des quantités variables selon les espèces, mais aussi selon leur croissance. L'*annexe 1* regroupe, pour quelques espèces, des paramètres d'influence comme la croissance, le rendement et les quantités d'éléments prélevés.

D'après (Takeda et al., 2009), le seigle et le colza rendent plus disponible le Phosphore. Mais les couverts peuvent aussi diminuer la disponibilité de P en le mobilisant sous forme organique (Blanco-Canqui et al., 2015).

(Ovalle et al., 2007) ont constaté une augmentation des teneurs du sol en P et K avec du trèfle souterrain (*Trifolium subterraneum L.*), de la luzerne polymorphe (*Medicago polymorpha L.*) et du trèfle de Micheli (*Trifolium michelianum Savi.)* après 2 ans d'enherbement.

Les crucifères réduisent la lixiviation du S (Couëdel et al., 2018).

[3] Le dosage des deux éléments dans le sol permet de calculer le rapport C/N. Il aide à juger du degré d'évolution de la matière organique, en particulier de l'importance de sa transformation en éléments minéraux (Chambre d'agriculture 66).

Figure 7 : Outils de destruction du couvert sans travail du sol (source CICOVI)

à gauche : Désherbeuse à disque Roll’n’Sem ®

à droite : Rouleau type « Faca »

(Pool et al., 1990; Sprin and Delabays, 2006) n'ont pas constaté de différence de teneur pétiolaire pour le Potassium, le Phosphore, le Magnésium et la Calcium avec des couverts permanents et temporaires.

Enfin, pour un couvert permanent, les quantités et le rythme d'absorption seraient réduites pour l'Azote, le Potassium et le Magnésium (SCHALLER, 1999).

- **Les couverts limitent les phénomènes de lessivage et d'érosion,**
- **Ils peuvent être source d'une concurrence hydro-azotée entre la vigne et le couvert,**
- **Les légumineuses contribuent à enrichir le sol en azote par fixation symbiotique de l'azote atmosphérique,**
- **La destruction de l'engrais vert permet la restitution à la vigne, sous forme assimilable, d'éléments absorbés durant l'hiver. Cependant, les études ne tendent pas encore vers un consensus sur le rythme et la quantité d'éléments (autre que l'N) absorbés par la vigne enherbée.**

- **Mode de destruction et travail du sol**

Il est possible de restituer au sol la biomasse fournie par le couvert de différentes façons : roulage, broyage, tonte, enfouissement. Cela a un impact sur la vitesse de dégradation du couvert et sur sa minéralisation (Gontier, 2015).

Selon (Frey, 2016), dans le Languedoc, l'entretien de l'enherbement se résume surtout à la tonte (96% des cas), avec l'émergence du roulage (4% des cas). Cette destruction du couvert est principalement réalisée autour du débourrement de la vigne.

Le C/N de l'espèce semée est un des paramètres majeurs conditionnant la vitesse de restitution. Plus il est faible, plus la minéralisation est rapide. Les sols viticoles sont souvent carencés en humus « labile » à cause d'un excès d'apport ligneux au C/N élevé (sarments par exemple) (Thomas and Archambeaud, 2013).

Sans cette source d'énergie issue d'une activité biologique performante, la MO est inerte et bloquée. Par conséquent la minéralisation est ralentie et une consommation excessive d'Azote au détriment de la vigne peut même entraîner une « faim d'azote ».

Le travail mécanique aère le sol, lui permettant de sécher, de s'oxygéner plus rapidement et ainsi de se réchauffer : la minéralisation est précipitée, entraînant un flux immédiat de fertilité. (Thomas and Archambeaud, 2013).

Or il est possible d'enfouir la biomasse aérienne du couvert détruit. Lorsque l'incorporation se fait 1 à 2 jours après broyage, la décomposition est rapide et la minéralisation importante. L'enfouissement se fait avec un outil à dents ou à disques, en surface.

Il est préférable de laisser le couvert en surface par un broyage, un mulchage, une fauche ou un roulage avant de labourer. Le mulch protecteur se dégrade plus lentement. Les résidus de légumineuses ont un C/N bas et sont donc consommés plus rapidement par l'activité biologique.

Le broyage est un mode de destruction efficace, mais il a l'inconvénient d'être coûteux et lent, surtout lorsque les biomasses produites sont importantes.

La destruction par roulage est rapide et peu coûteuse. En revanche, elle n'est efficace que sur des plantes suffisamment développées et peu lignifiées. La technique consiste à pincer et à blesser la plante en plusieurs endroits. Les outils *figure 7* sont basés sur ce principe de lacération. Les espèces à tiges creuses comme la féverole se prêtent bien à ce mode de destruction.

L'entretien par la tonte est aussi envisageable. Mais une tonte précoce « booste » le couvert qui développe de jeunes pousses agressives (Thomas and Archambeaud, 2013). Ceci est aussi fonction de l'espèce. Comme indiqué en *annexe 1*, certaines espèces repoussent plus facilement que d'autre (ray-grass italien, navette fourragère…).
La faucheuse à sections ou rotatives, le gyrobroyeur à axe vertical ou encore le broyeur à couteaux à axe horizontal sont des outils de tonte du couvert.

Figure 8 : Synthèse des outils analytiques permettant le suivi complet de l'assimilation minérale au cours la saison

2.3 Formulation de la problématique

a) Contexte Languedocien

En Languedoc (hors Pyrénées-Orientales), près de 80% des surfaces ne sont pas enherbées, 15% le sont de manière temporaire et seulement 11% des surfaces ont un enherbement permanent spontané (Frey, 2016). Principal facteur explicatif de ce niveau d'adoption faible : *l'impact sur la vigueur et le rendement* lié à la compétition pour l'eau et l'azote entre la vigne et le couvert (Celette et al., 2009).
Ces craintes liées au rendement, facteur majeur de rentabilité, sont les plus exprimées par les vignerons du Languedoc (Frey, 2016). D'autant plus dans un contexte de changement climatique qui laisse entrevoir une augmentation de l'ETP, une diminution du nombre de jours de précipitations efficaces et une hausse des températures (Fraga et al., 2018; IPCC, 2013). Ceci affecterait négativement la vigne, particulièrement en conditions méditerranéennes (Costa et al., 2016).

En parallèle des défis climatiques et environnementaux, l'ensemble de la filière à l'échelle languedocienne doit maintenir son potentiel viticole sur une riche mosaïque de terroirs pour s'adapter aux marchés nationaux et internationaux.
Ce maintien du potentiel passe par l'équilibre minéral de la plante. Ce dernier est trop souvent délaissé au profit d'interventions œnologiques certes performantes mais qui négligent le fait que *« la nutrition de la vigne est le premier geste œnologique »* (Matthieu Dubernet).

b) Création de la Société de Recherche et Développement Viticole (SRDV)

C'est dans ce contexte que les laboratoires Dubernet ont créé la SRDV : pour allier à leur suivi œnologique précis un outil de caractérisation de l'assimilation minérale qui permette de faire le lien entre vigne et vin. Deux structures locales les accompagnent dans leur démarche et apportent un ensemble de connaissances agronomiques : CICOVI (cabinet de conseil viticole) et Natoli&Co (conseils œnologiques et agronomiques).

De cette collaboration est né un outil de conseil performant : le suivi et le conseil de la fertilisation *via* l'analyse pétiolaire.

Dans l'objectif d'apprécier l'état nutritionnel de la plante, l'analyse des éléments dans la matière sèche des limbes ou des pétioles permet de cibler correctement les besoins de la plante (Carbonneau et al., 2015).

C'est un outil pertinent pour le suivi en temps réel de la dynamique d'assimilation de la vigne, depuis les stades précoces de boutons floraux séparés jusqu'à la chute des feuilles, avec des délais courts de l'ordre de quelques jours. L'analyse pétiolaire permet donc de suivre la dynamique des flux minéraux au cours des différents stades phénologiques. (Dubernet et al., 2015)

Pour étoffer son offre d'outils analytiques et proposer un suivi complet, la SRDV a élargi son expertise à d'autres mesures : analyses de sols, de sarments, d'engrais et analyses de moûts complètent les diagnostics *(figure 8)*. Inclure les analyses de moûts illustre bien la volonté d'une réflexion globale, le concept d'agro-œnologie, au cœur de la démarche de la SRDV. En parallèle, un réseau de 12 parcelles de références localisées dans l'Aude, le Gard et l'Hérault a été mis en place pour connaître les tendances du millésime et s'y adapter.
Enfin, une activité de recherche et développement vient approfondir des notions théoriques (assimilation minérale, relation vigne/vin) en s'appuyant sur des expérimentations mises en place chaque année. Il paraît donc logique que la SRDV s'intéresse à une pratique culturale comme l'enherbement.

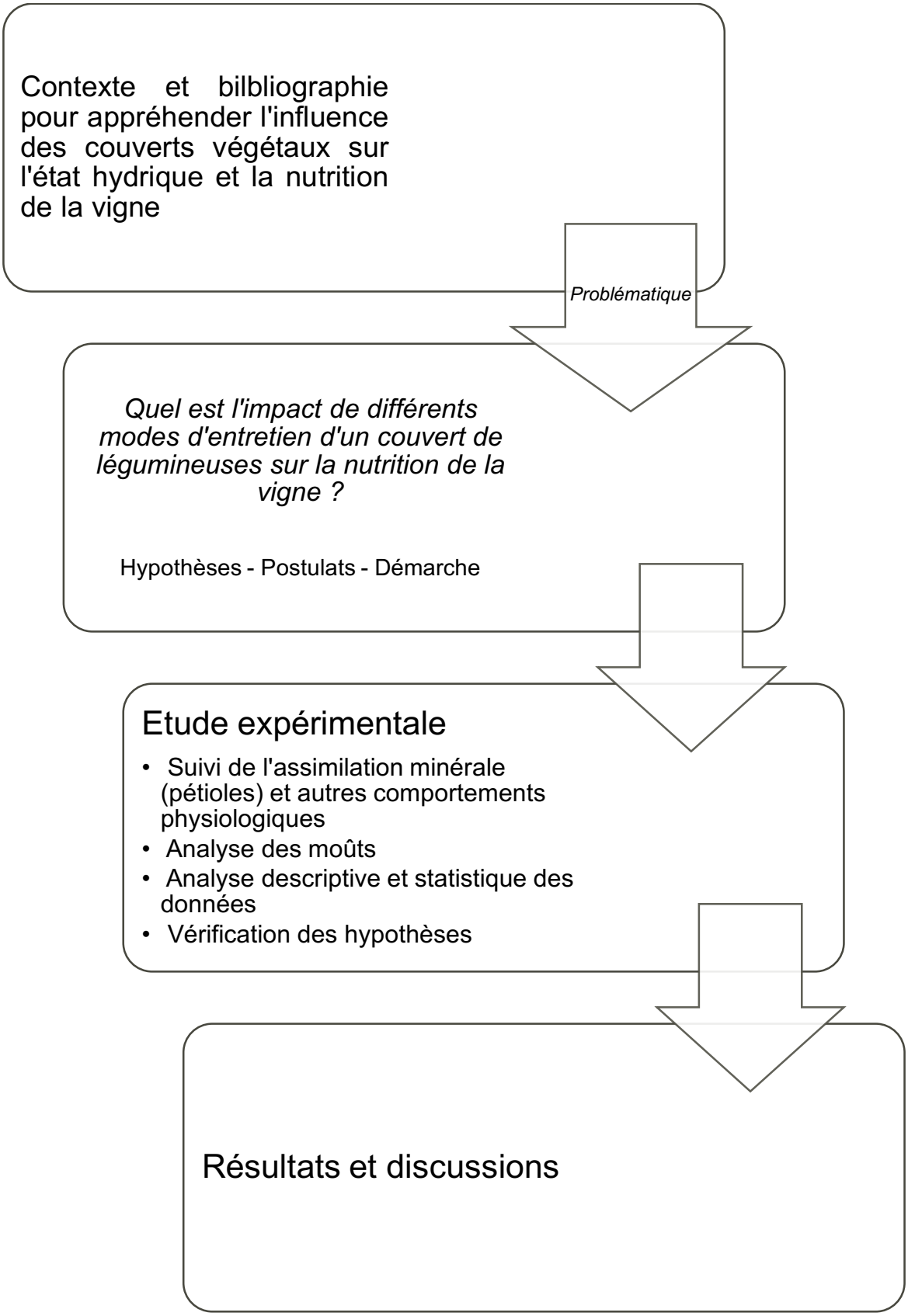


Figure 9 : Schéma méthodologique de l'essai

c) Problématique

Enherber les vignes est aujourd'hui considéré comme une alternative durable aux pratiques d'entretien du sol conventionnelles en viticulture (Meziere et al., 2009). Sa mise en place est envisagée par certains professionnels du Languedoc. Les services agronomiques de l'enherbement sont liés au sol et à l'environnement (biodiversité, MO, érosion, portance, engrais vert *etc.*). Les craintes et réticences sont principalement liées à un possible impact négatif sur le rendement.

En parallèle, les connaissances sont encore limitées et les *a priori* nombreux du fait de l'émergence récente de ces techniques culturales.

Les services attendus et les modalités d'entretien sont multiples. C'est pourquoi la SRDV, pour affiner la caractérisation du comportement physiologique de la vigne dans une pluralité de situations, souhaite mesurer l'impact de l'enherbement et du travail du sol pour adapter son conseil *(figure 9)*.

La SRDV et le CICOVI ont donc mis en place une expérimentation sur la nutrition hydrique et minérale d'une vigne soumise à **6 conditions distinctes d'enherbement, se voulant représentatives des usages locaux**. Ces modalités jouent sur différentes intensités de concurrence et différents modes de destruction du couvert.

La problématique de cette étude est donc la suivante :

- *Quel est l'impact de différents modes d'entretien d'un couvert sur la physiologie de la vigne ?*

Plusieurs interrogations résultent de cette problématique :

- Constatons-nous des dynamiques différentes de la fourniture azotée (ou autre élément) selon l'entretien des légumineuses semées sur la parcelle ?
- Dans quelle proportion les outils de destruction du couvert limitent-ils sa repousse ?
- Le couvert a-t-il un impact sur la vigueur (dynamique de pousse, canopée…) et si oui par quels outils le mesurer ?
- Le couvert a-t-il un impact sur les rendements ? Modifie-t-il la qualité des moûts et donc l'équilibre des vins ?

		MO	Potentiel de fertilité	CaCO3 (%)
0-15cm	*Horizon humifère* • Limono-sableux • Perméable, meuble et grumeleux • Débris secs en décomposition	1,76	++	5,8
15-60cm	*Horizon labouré* • Limono-argileux • Brun, humide et frais • Mottes polyédriques 5/7cm • Porosité moyenne • Rejet de 20% • 30 racines/dm² (réseau homogène et fin)	1,29	+	0,9
60-90cm	*Horizon de tuf* • Galets calcaires compactés dans une matrice argilo-sableuse, rejet 60% • Humide et compact • Traces d'oxydation • 10 racines/dm²	1,16	-	32,4
90-160cm	*Horizon de galets* • Gros galets enchevêtrés dans une matrice sableuse • Humide et drainant • Traces d'oxydation • 30 racines/dm²			

Figure 10 : Profil pédologique de la parcelle d'essai ; description des horizons et résultats d'analyse de sol par horizon

Tableau 3 : Résultats de l'analyse de sol de la parcelle expérimentale (SRDV)

pH eau	MO	C/N	CEC	%Sables grossiers	%Sables fins	%Limons grossiers	%Limons fins	%Argiles
8,22	2,1	10	13	30,5	13,1	7,2	15,9	33,3

Les limites de quantifications et incertitudes de mesures sont présentées en annexe 4.

Partie 3 MATERIELS ET METHODES

3.1 Dispositif expérimental

a) Parcelle à l'étude

L'essai a été implanté sur une parcelle appartenant au château Notre-Dame de Quatourze, en AOP Languedoc Quatourze au sud de Narbonne (11) à 5 m d'altitude (43°15'93''N – 3°00'80'' E).

Le climat est à dominante méditerranéen. La normale des précipitations est de 627mm et la température moyenne annuelle de référence est de 14,9°C (Météofrance).

Le cépage est la Syrah N, greffé sur 3309C, planté en 2005. La densité est de 4000 pieds/ha (écartement de 2,5 *x* 1m). La vigne est orientée N-S et conduite en espalier simple palissé (guyot simple).

La parcelle est équipée d'un système d'irrigation au goutte-à-goutte. Les objectifs de production sont qualitatifs (AOP Languedoc Quatourze).

Cette parcelle est historiquement conduite en bio depuis 15 ans. Des couverts végétaux y sont implantés depuis autant d'années.

La fertilisation hivernale (2019) est composée d'un apport de fiente de volaille (3,5.2.2,5) à 1,5t/ha et d'un apport de compost du domaine, dont l'analyse complète est présentée en annexe 3.

b) Caractérisation agronomique du sol

La parcelle expérimentale est située dans l'ancien delta de l'Aude sur un Colluviosol très profond, argilo-sableux, calcaire, hydromorphe, alluvio-colluvial de type réductique-salique (RP 2008).

L'analyse de sol s'est faite à partir de 3 sondages à la tarière, en diagonales sur la parcelle, sur 30 centimètres de profondeur.

Le *tableau 3* compile les propriétés physico-chimiques de ce sol. L'ensemble des résultats est disponible en annexe 2.

Il s'agit d'un sol viticole relativement riche en matière organique (2,09%) au C/N équilibré. Le stock en éléments majeurs y est très satisfaisant, avec un rapport K/Mg équilibré. Le pH y est basique (8,2) mais le taux de calcaire total est bas (7,1%).

Le stock en oligo-éléments est relativement faible, notamment en Fer (9mg/kg).

La CEC est satisfaisante, signe d'une bonne disponibilité des éléments.

Une fosse pédologique (22 juillet) a permis de caractériser l'organisation du sol sur sa profondeur (figure 10).

Ce sol peut se décomposer en 4 horizons sur une profondeur d'1,6m.

C'est un sol profond et humifère, avec un horizon compact dit de « tuf » à 60cm qui limite la pénétration racinaire. Néanmoins, on retrouve des racines dans l'horizon de galets inférieur, signe qu'elles parviennent à pénétrer l'horizon de tuf.

Les niveaux de matière organique sont satisfaisants pour un sol viticole, même en profondeur. Cette bonne répartition verticale est attribuable à un bon fonctionnement global du sol permis par les quinzes années de couverts végétaux.

Autre point : la proximité avec le littoral engendre une disponibilité et une assimilation importante du Sodium.

C'est donc un sol profond et fertile sur lequel la vigne profite d'une réserve hydrique importante.

c) Protocole expérimental

Les modalités sont représentées spatialement et décrites *figure 11*.

Chaque modalité est mise en œuvre sur 4 inter-rangs consécutifs. La modalité 1 en bord de parcelle couvre 6 inter-rangs pour éviter un effet bordure. L'expérimentation occupe 2/3 de la surface totale de la parcelle de 1,12 ha. La partie Ouest a été choisie car homogène et moins vigoureuse.

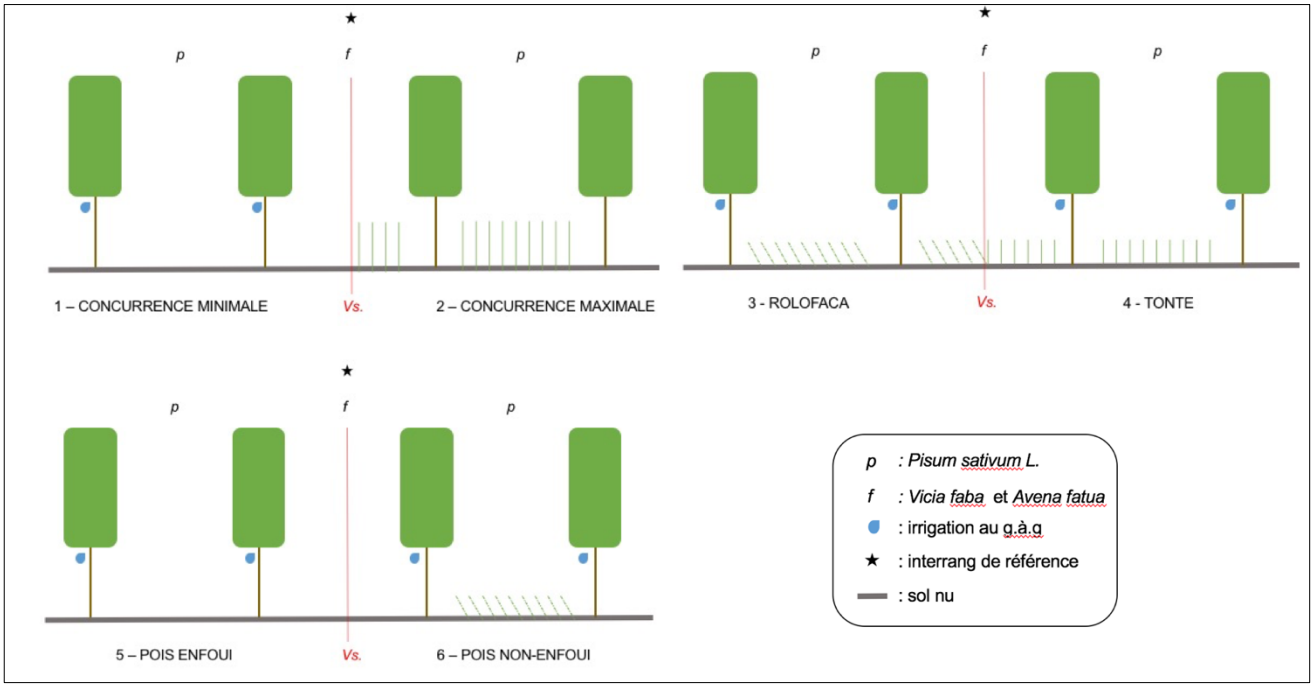


Figure 11 : Représentation graphique des modalités

Modalité		Automne-Hiver	20-mars	21-mai	01-juin	08-juil	Irrigation
1	**Concurrence minimale (confort hydrique)**	Buttage du rang Semis des couverts Apport compost et engrais	Destruction de la féverole	**Tonte** pois et IR féverole*	Enfouissement/travail du sol	Travail du sol	Oui
2	**Concurrence maximale (stress hydrique)**						Non
3	**Destruction au rolofaca**			**Rolofaca** pois et IR féverole			Oui
4	**Entretien par tontes**			**Tonte** pois et IR féverole			
5	**Pois enfoui**				Enfouissement/travail du sol	Travail du sol	
6	**Pois non enfoui**						

Tableau 4 : Modalités mises en œuvre sur la parcelle à l'étude

*IR féverole : Inter-rang où était initialement présente la féverole mais où différents adventices ont poussé suite à sa première destruction.

Les variantes en 4 rangs permettent d'avoir 2 rangs de bordure et entre eux 1 inter-rang d'observation. L'ensemble des mesures effectuées se font sur cet inter-rang de référence, sur 10 ceps clairement identifiés.
L'entretien du sol sous le rang est effectué mécaniquement par décavaillonage en début de saison (28 mars).

Les couverts végétaux intercalaires sont semés en octobre de l'année n-1, tous les inter-rang, soit sur 60% de la surface de la parcelle.

Ils sont semés avec du pois fourrager (*Pisum sativum L.*) ou de la féverole (*Vicia faba*). Le pois et la féverole sont des *fabacées*, capables de fixer l'N_2 atmosphérique. Leur C/N faible garantit une décomposition rapide des résidus. Les deux espèces sont facilement destructibles (roulage, disquage, tonte…).

Au total, six modalités ont été comparées afin d'étudier différents aspects des couverts végétaux (cf. *tableau 4*) :

- **Intensité de concurrence** : La modalité (1) est une modalité témoin. Le couvert est enfoui avant l'entrée en compétition pour les ressources, puis l'entretien du sol limite les repousses. En aérant le sol, le labour provoque un flux de minéralisation qui rend plus disponible l'azote. A l'inverse, la (2) vise à mesurer les conséquences d'une forte concurrence. Cette modalité n'est pas irriguée. La destruction des couverts y est très partielle avec seulement une destruction précoce de la féverole. Le sol n'est plus travaillé par la suite. Le risque de compétition y est plus élevé.
- **Efficacité de destruction** : Les modalités (3) et (4) mesurent l'incidence de différents mode d'entretien du couvert. Sur la (3) par rolofaca et sur la (4) par des tontes régulières. Le taux de couverture du sol par les repousses permet de suivre l'efficacité de destruction de ces méthodes. Une destruction plus efficace doit limiter la concurrence pour les ressources hydro-azotées.
- **Dynamique de restitution azotée** : les modalités (5) et (6) visent à différencier les dynamiques de restitution minérale du pois. Sur la (5), il est enfoui et le sol est travaillé. Sur la (6), il est détruit et laissé sur place. On s'attend donc à ce que le flux de minéralisation soit plus important pour la modalité 5.

L'ensemble des mesures déployées visent à caractériser les effets de concurrence du couvert pour les ressources hydriques et minérales. Il s'agit donc de suivre le fonctionnement physiologique de la vigne au cours de son cycle végétatif (figure 12). Les mesures s'effectuent sur les 10 ceps identifiés par modalités, soit 10 répétitions par modalités.

3.2 Mesures et méthodes de suivi

La répartition des mesures sur le cycle est présentée figure 12.

- **Indicateurs climatiques**

Les données sont extraites de la station météo du laboratoire Dubernet à Montredon-les-Corbières (43°18'12''N – 2°93'35''E, 36m d'altitude) marque Davis modèle Vantage Pro 2 ®. Cette station a été choisie du fait de sa proximité avec la parcelle. L'extraction des données permet de calculer l'indice de Degré-jours de (Winkler, 1962), qui détermine la croissance de la vigne. Cet indice sert de base au calcul de la vitesse d'élongation des rameaux.

$$DJ\ (Degrés\ Jour\ \left(\circ\frac{C}{j}\right)) = \frac{Tmax - Tmin}{2} - Tbase$$

Avec $Tmax$ et $Tmin$ les températures maximales et minimales quotidiennes (°C) et $Tbase$ le zéro de végétation, référencée à 10°C pour la vigne (°C).

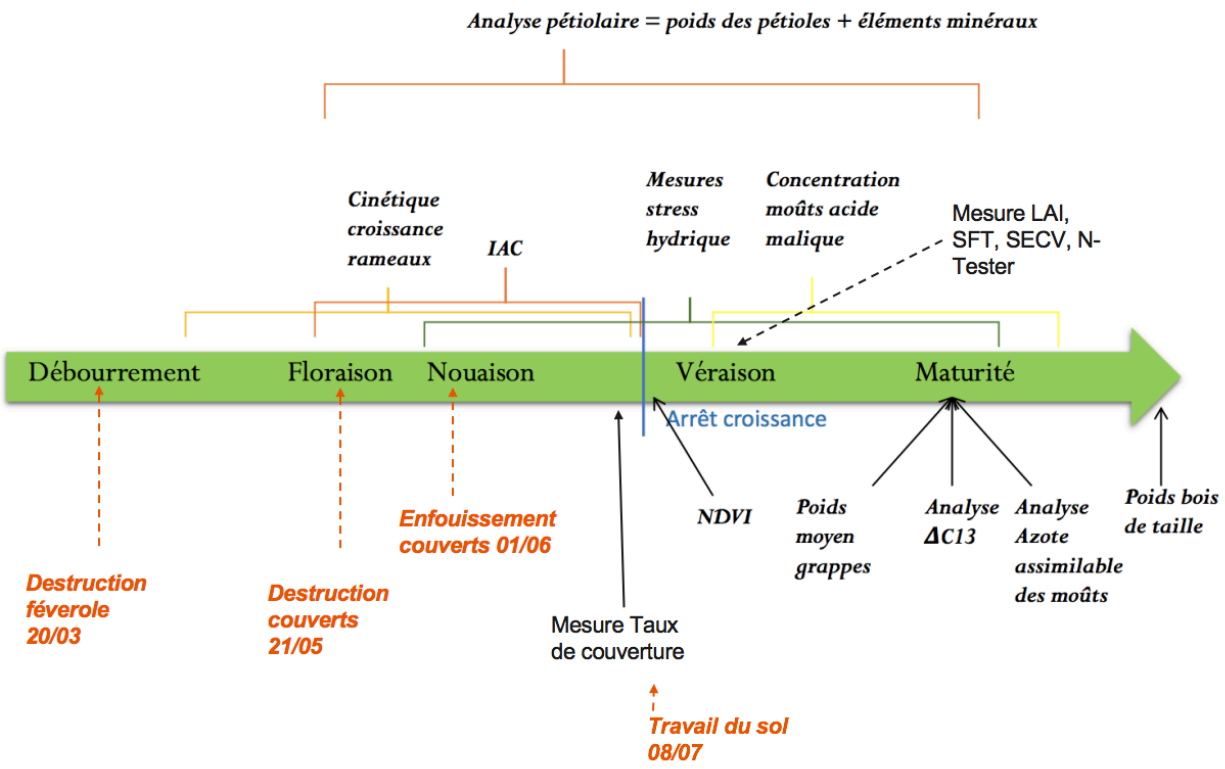


Figure 12 : Répartition des mesures et des interventions sur le cycle

Les données de cumul pluviométrique et de temps thermique sont extraites de cette station.

- **Indicateurs pédologiques**

Une analyse de sol et une fosse pédologique de 1,6m de profondeur, complétées par l'étude des pédopaysages du Languedoc (Etude n°2166, 1999) ont permis d'évaluer le contexte pédologique de la parcelle : composition du sous-sol, nombre et types d'horizons culturaux, texture, potentialités agronomiques, profil hydrique et racinaire, état humique…

a) Suivi du couvert

L'estimation des **restitutions** potentielles en N-P-K du couvert ainsi que le pourcentage de **couverture du sol** après destruction permettent d'évaluer d'une part l'apport nutritif du couvert détruit et d'autre part la concurrence pour les ressources de la biomasse en place :

- **Méthode MERCI**

La mesure de la biomasse de chaque espèce présente dans le couvert permet de calculer les quantités d'éléments présents dans ce couvert (méthode MERCI[4] v2.9, CA Poitou-Charentes, (Coucheney et al., 2015)).
La fiabilité des résultats est estimée à plus ou moins 15 kg/ha d'azote. La restitution par espèce est calculée à l'hectare. On estime à 60% la couverture par les couverts. La biomasse fraîche de pois fourrager a été pesée le 20 mai. Trois prélèvements de la totalité de la biomasse aérienne sur 1m^2 permettent le calcul par la méthode MERCI version 2.9.

La destruction précoce de la féverole (28 mars) a obligé à une estimation à partir de données régionales et de résultats obtenus en 2019.

- **Pourcentage de couverture**

Le taux de repousse du couvert après destruction a été évalué 1 mois et 9 jours après destruction, le 10 juillet 2020 à l'aide de l'application mobile CANOPEO® version 2.0.
Cette application permet de calculer la fraction de couverture par la biomasse à partir d'indices spectraux (Rouge/Vert, Bleu/Vert et l'indice d'excès de vert 2*Vert-Rouge-Bleu) (Patrignani and Ochsner, 2015).

13 prises de vues horizontales, à 1m du sol, sur chaque inter-rang de référence, permettent d'évaluer le taux de couverture du sol par l'enherbement de chaque modalité.

b) Assimilation minérale

Les analyses de sol ont permis d'évaluer l'offre potentielle. L'assimilation minérale reflète la nutrition effective des vignes.

- **Analyse pétiolaire et analyses de sol**

Prélèvement pétiolaire

Le prélèvement s'effectue sur chaque inter-rang de référence, aux stades clés suivants : boutons floraux séparés, nouaison, taille de pois, fermeture de grappe, véraison et maturité. Les stades phénologiques sont évalués selon le référentiel Baillod et Baggiolini. Chaque stade phénologique est atteint lorsque la moitié des individus présentent les caractéritiques morphologiques propres au stade.

Un échantillon minimal de 30 grammes est prélevé, ce qui correspond à une cinquantaine de pétioles.

Les pétioles sont prélevés en zone fructifère, en face de la première ou de la seconde grappe, sur les sarments les plus proches du tronc. Un seul pétiole par cep est prélevé. Ce zonage permet de limiter la variabilité imputable au gradient de concentration de certains éléments en fonction de leur position sur le rameau.

[4] Méthode d'estimation des éléments restitués par les cultures intermédiaires

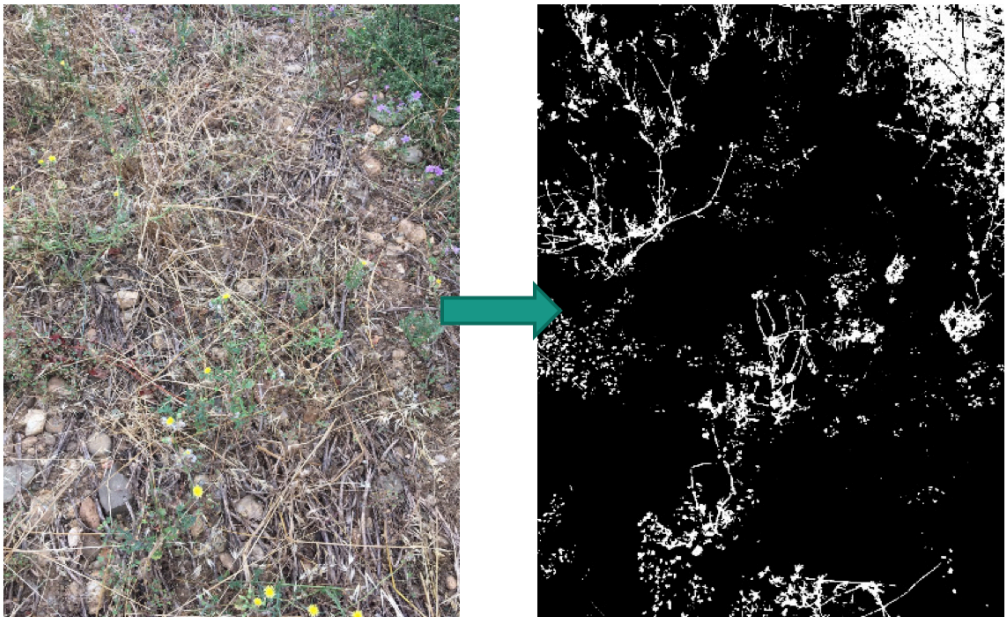


Figure 13 : Calcul du taux de couverture par l'application CANOPEO® ; il est ici de 11%, sur la modalité 2 (source personnelle)

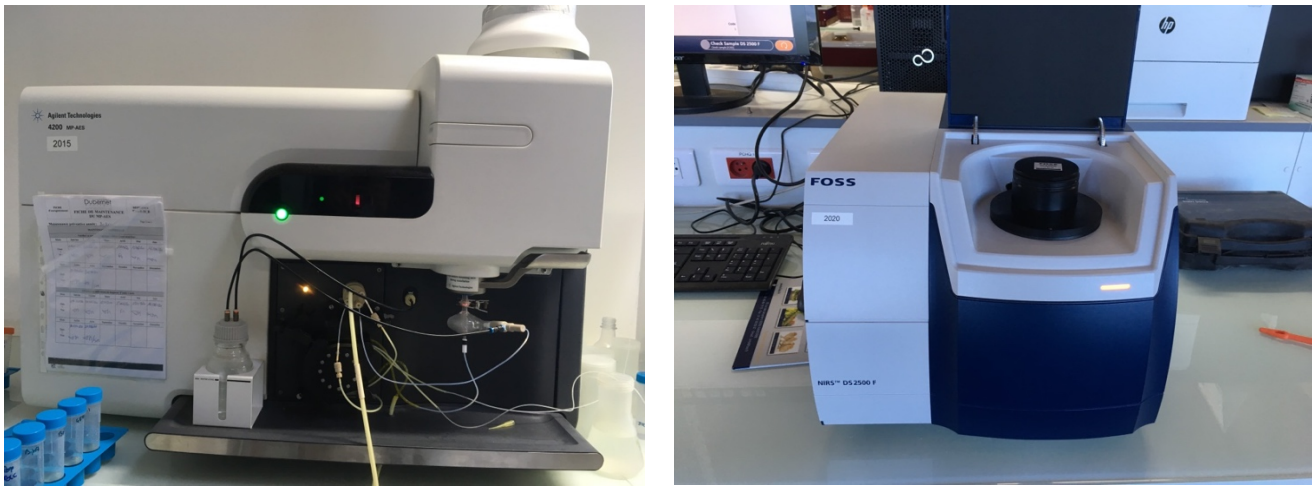


Figure 14 : MP-AES (Agilent technologies 4200 ®) et NIR Foss ® au laboratoire Dubernet (source personnelle)

Tableau 5 : Limites de quantification et incertitude ; * pour une prise d'essai de 0,25 g et un volume final de 50 mL

Elément	Méthode	Limite de quantification*	Incertitude
Bore	MP-AES	1 mg/kg m.s.	20 % (sauf Ca et P à 21%)
Calcium		0,1 % m.s.	
Cuivre		2 mg/kg m.s.	
Fer		2 mg/kg m.s.	
Potassium		0,1 % m.s.	
Magnésium		0,1 % m.s.	
Manganèse		5 mg/kg m.s.	
Sodium		20 mg/kg m.s.	
Phosphore		0,03 % m.s.	
Zinc		10 mg/kg m.s.	

Analyse chimique des pétioles et des sols

Pour doser **l'azote**, l'analyseur élémentaire ThermoFLASH 2000 constitue la méthode de référence, dont le protocole s'appuie sur la méthode Dumas (1831).

Toutefois, cette méthode est substituée par une méthode de routine accréditée par le COFRAC[5] : le **NIRS** (*Near InfraRed System*). Cette technique repose sur la mesure et l'analyse des spectres de réflexion dans le domaine du proche infra-rouge (PIR, 0,78 à 2,5µm). Sa haute résolution spectrale et le temps d'analyse très court permettent d'analyser une grande quantité d'échantillons en routine.

Néanmoins, sa précision dépend fortement de son étalonnage car les valeurs obtenues sont issues d'une base de données et d'un ensemble d'équations qui corrèle les spectres obtenus avec les valeurs préalablement déterminées par la méthode de référence (annexe 5). Son calibrage est donc déterminant et doit être basé sur une base de données conséquente.

Les **cations majeurs et les oligo-éléments** sont quant à eux dosés par extraction solide/liquide par acétate d'ammonium puis par dosage par MP-AES. Cet appareil de spectrométrie à plasma à couplage inductif permet de doser la quasi-totalité des éléments simultanément, pour les pétioles et pour les sols.

Les limites de quantification et incertitudes des mesures sont présentées tableau 5. L'incertitude de mesure est de 20% sur tous les éléments hormis le Calcium et le Phosphore pour lesquels elle est de 21%.

L'activité biologique du sol a été mesurée par cytométrie en flux sur 3 échantillons de sols homogénéisés à partir de 3 prélèvements chacun. Cette technologie récemment développée au laboratoire permet d'obtenir des informations précises sur la taille des populations, leur viabilité, leur vitalité et/ou leur mortalité.

- **Statut azoté (N-Tester)**

En complément, le statut azoté a été estimé à véraison à l'aide d'un chlorophyll-meter (N-Tester ® BT, Yara, France, figure 15). Le protocole est le suivant : 6 mesures sur 5 feuilles saines, adultes et actives permettent d'aboutir à un indice interne au N-Tester ®, lié à la teneur en chlorophylle des feuilles. Cette indice ne donne pas directement accès à a teneur azoté des feuilles, mais permet une estimation du statut azoté du cep. La mesure sur 10 cep par modalité permet d'aboutir à une moyenne pour chaque modalité.

- **Sur moût :**

Les mesures se font sur un échantillon de 15 grappes par modalités prélevées aléatoirement. Ces grappes sont pressées pour obtenir un minimum requis de 100mL de moût. Cet échantillon est ensuite analysé en méthode de routine par l'appareil OenoFoss ®.

Les mesures portent sur :

- **L'azote assimilable**. L'azote assimilable dans les moûts est la fraction azotée utilisable par les levures pour leur métabolisme au cours de la fermentation alcoolique. On distingue dans l'azote assimilable la fraction minérale (l'azote ammoniacal (NH4+)) et la fraction organique (les acides alpha-aminés). Les teneurs en azote assimilable des raisins et des moûts sont déterminées par l'historique d'assimilation de l'azote par la vigne au cours de la saison.
    - Cette mesure peut donc refléter des concurrences pour les ressources hydro-azotée qui diffèrent selon les modalités.
- **Un bilan minéral complet**. La mesure des autres éléments par MP-AES dans le moût vient compléter les assimilations mesurées par analyse pétiolaire.
- L'indice **DeltaC13**. L'état hydrique de la vigne peut être évalué avec pertinence grâce à la discrimination isotopique du carbone des produits primaires de la photosynthèse de la vigne (ΔC13) (Leeuwen et al., 2009). Ce ΔC13 est un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation.

[5] Le **Comité français d'accréditation** (**Cofrac**) est une association chargée de délivrer les accréditations aux organismes intervenant dans l'évaluation de la conformité en France.

Figure 15 : N-Tester Yara ® en cours d'utilisation (source personnelle)

- L'azote assimilable, l'acide tartrique, malique, le pH et le taux de sucres sont mesurés par IRTF (Spectroscopie InfraRouge à Transformée de Fourier) avec le WineScan FT120 de Foss®.

c) Évaluation de la vigueur et de la contrainte hydrique

- **Dynamique de croissance**

Lors de la phase de croissance végétative, deux rameaux par cep marqué (soit 20/modalité) sont mesurés de manière hebdomadaire. Du fait de casses récurrentes (vent, rognage…), le suivi s'est fait sur un rameau long et un rameau moyen tous deux marqués.
Ces données permettent de calculer la vitesse d'élongation des rameaux selon la formule suivante :

$$V_{elong} = \frac{L_{rameau}(n) - L_{rameau}(n-1)}{DegréJour(n) - DegréJour(n-1)}$$

- **Surface foliaire**

Afin de caractériser la canopée et évaluer le potentiel végétatif de chaque modalité, le choix s'est porté sur trois indicateurs, mesurés sur les 10 ceps marqués de chaque modalité.

La méthode (Lopes and Pinto, 2000) :

Cette méthode permet d'extrapoler la surface foliaire d'un rameau à partir du nombre de feuilles par rameau et de la surface de la plus petite et de la plus grande feuille.

Il est possible d'estimer la surface d'une feuille de Syrah à partir de la longueur de la nervure selon la formule suivante (Tregoat, 2004) :

$$S_{feuille} = 2{,}45 * {L_{nervure}}^{1{,}86}$$

On aboutit alors à :

$$SFE = \left[\frac{(S_{min} + S_{max})}{2} * N_{feuilles}\right] * N_{rameau} * d$$

où SFE est la surface foliaire totale (m^2/ha), S_{min} et S_{max} les surfaces des plus petites et plus grandes feuilles (m^2), $N_{feuilles}$ le nombre moyen de feuilles par rameau, N_{rameau} le nombre de rameau par cep et d la densité (cep/ha)

La mesure de la nervure est une moyenne sur deux feuilles et la densité prend en compte le nombre exact de manquants par modalité.

La surface externe du couvert végétal (Murisier, 1996) :

Cet indicateur représente la couche de feuillage exposé, c'est-à-dire actif pour la photosynthèse. En effet, toutes les feuilles ne contribuent pas à la production de sucres du fait d'exposition variées. Pour les modes de conduite en espalier, on l'obtient de la manière suivante :

$$SECV = \frac{2 * H + W}{E} * (1 - P)$$

avec H la hauteur de la canopée, W sa profondeur à mi-hauteur, E la distance inter-rang et P la porosité

Le Leaf Area Index (LAI) :

Le LAI estime la surface du plan de végétation par unité de sol à partir d'une photographie prise en dessous du cordon, au niveau du sol. Cette mesure permet aussi d'estimer la porosité de la végétation. Le LAI est une grandeur sans dimension. 10 prises de vues par modalité (une par cep identifié) à véraison ont permis de calculer cet indice grâce à l'application mobile Viticanopy v1.1 (Fuentes et al., 2014).

NDVI

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est un indice normalisé compris entre -1 et 1, calculé à partir des canaux rouges et proche infrarouge. Il repose sur le contraste entre ces deux canaux : l'absorption du pigment chlorophyllien dans le canal rouge et la haute réflectivité des matières végétales dans le canal proche infrarouge.

Les végétaux ont des valeurs NDVI positives, comprises entre 0,1 et 0,7, les valeurs les plus élevés correspondant aux végétations les plus denses. Lors d'un stress hydrique, la végétation jaunie et a une moindre réflexion dans la plage proche infrarouge. Cet indice nous permet donc de suivre l'évolution de la contrainte hydrique sur la parcelle.

Les bandes spectrales Rouge (665nm) et NIR (842nm) sont extraites d'images produites par le satellite Sentinel-2 sur le site LandViewer (https://eos.com/landviewer/?s=Sentinel2), exempts de pollutions (nuages, réflexions…) puis traitées sous QGIS Desktop (version 3.12.3) pour obtenir l'indice NDVI normalisé (Rouse Jr et al., 1974).

Les images, d'une précision de plus ou moins cinq mètres, ne nous permettent pas un suivi à la modalité près.

L'exploitation de ces images permet néanmoins un suivi de la vigueur (Devaux et al., 2019). Quatre prises de vue ont ainsi été extraites le 27 mai, le 21 juin, le 27 juillet et le 25 août. A chaque prise de vue, le NDVI moyen de la parcelle est calculé.

- **Contrainte hydrique :**

Potentiel hydrique foliaire de tige

Une autre approche consiste à évaluer l'état hydrique de la plante par l'intermédiaire d'indicateurs physiologiques. Ces indicateurs sont nombreux. Le choix s'est porté sur le potentiel hydrique foliaire de tige au midi solaire (Ψ_m) mesuré par une chambre à pression (Scholander et al., 1966).

Le potentiel de tige se mesure au midi solaire, lorsque la demande climatique est importante. Il est calculé sur un échantillon de 5 feuilles préalablement ensachées sur pied le temps que, la transpiration étant arrêtée, le potentiel hydrique de la feuille s'équilibre avec le potentiel hydrique du rameau, représentatif du statut hydrique de la plante entière (IFV, n.d.)

Un bilan hydrique, comparé aux résultats des mesures de potentiel, est positionné en annexe mais ne présente pas d'intérêt supplémentaire dans le cadre de l'étude..

Méthode des apex

« La méthode des apex permet de suivre l'évolution de la croissance des vignes et d'estimer le niveau de contrainte hydrique. […] Elle consiste à observer une cinquantaine d'apex et à les classer selon trois catégories (pleine croissance, croissance ralentie ou arrêt de croissance). Le calcul d'un indice synthétique, appelé indice de croissance des apex (IAC), permet ensuite de caractériser la croissance végétative de la zone observée. La réalisation hebdomadaire de ces observations permet de caractériser la dynamique de croissance.» (IFV, 2020b).

d) Estimation du rendement

Le nombre moyen de grappe a été estimé à partir d'un comptage sur 10 pieds par modalités à Véraison. Le poids moyen a été estimé à partir d'un échantillonnage aléatoire sur quinze grappes par modalités à maturité :

$$R = P * n * d$$

Avec R le rendement estimé (kg/ha), P le poids moyen d'une grappe (kg), n le nombre moyen de grappes et d la densité, corrigée par le nombre de manquants (méthode IFV)

L'interprétation de ce résultat est à nuancer car les composantes du rendement en année *n* (nombre et poids des grappes) sont fortement dépendantes des conditions climatiques (température, statut hydrique et azoté) en encadrement de floraison en année *n-1* (Zhu et al., 2020).

Par ailleurs, la forte pression mildiou (*Plasmopara viticola)* a engendré des pertes de récolte du fait de grappes endommagées.

3.3 Stratégie d'analyse des données

Les analyses statistiques sont réalisées à partir du logiciel R (Team, 2013), version 3.6.1.
Les stratégies d'analyse des données sont résumées tableau 6 :

- **Tests statistiques réalisés :**

ANOVA et ACP

L'ANOVA permet de comparer une série de moyennes pour différents groupes d'individus (modalités). Pour que ce test soit valable, il faut au préalable vérifier la normalité des individus (test de Shapiro-Wilk) et l'homogénéité des variances (test de Levene). Si l'un des postulats n'est pas respecté, on peut dans ce cas utiliser le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis. C'est un test d'égalité des médianes moins robuste que l'ANOVA. Les tests pos-hoc qui font suite sont le test de Tukey HSD pour l'ANOVA et le test de Wilcoxon pour Kruskal-Wallis. L'ACP est utilisée pour mettre en relation les variables sans répétition (données pétiolaires, analyses de moût) avec les données de canopée afin de détecter d'éventuelles tendances/liens.

Tableau 6 : Stratégies d'analyse des données

Analyse		Var. dépendante	Var. explicative	Tests
Différenciation du taux de couverture selon les modalités			Taux de couverture de l'inter-rang par l'enherbement	Anova/tukey HSD ou Kruskal-Wallis/Wilcoxon*
Incidence du couvert et de son entretien sur :	**Le statut hydrique des vignes**	Elongation des rameaux, potentiel de tige, NDVI, N-tester, mesures sur la canopée, DeltaC13, Nass	Taux de couverture de l'inter-rang par l'enherbement (Quantitatif) Modalité d'entretien du couvert et du sol (Qualitatif)	Anova /tukey HSD ou Kuskal-Wallis/Wilcoxon ACP Matrices de corrélation Graphiques d'assimilations pétiolaires
	Leur alimentation minérale	Teneurs en éléments minéraux des pétioles et des moûts		
Description et distribution des données				*Box-plot, histogramme*

* si les postulats de départ de l'ANOVA ne sont pas vérifiés (normalité des individus et homogénéité des variances), alors le test effectué est le test non-paramétrique de Kruskal Wallis, moins robuste.

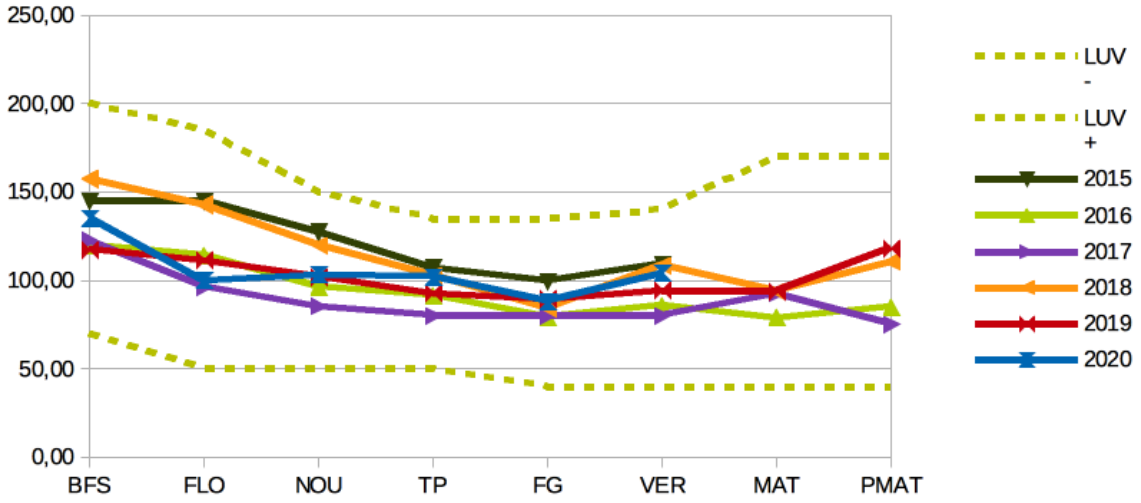


Figure 16 : **Azote** massique moyen, comparaison des derniers millésimes, en mg/100 pétioles (parcellaire de référence SRDV en Languedoc, 12 parcelles)

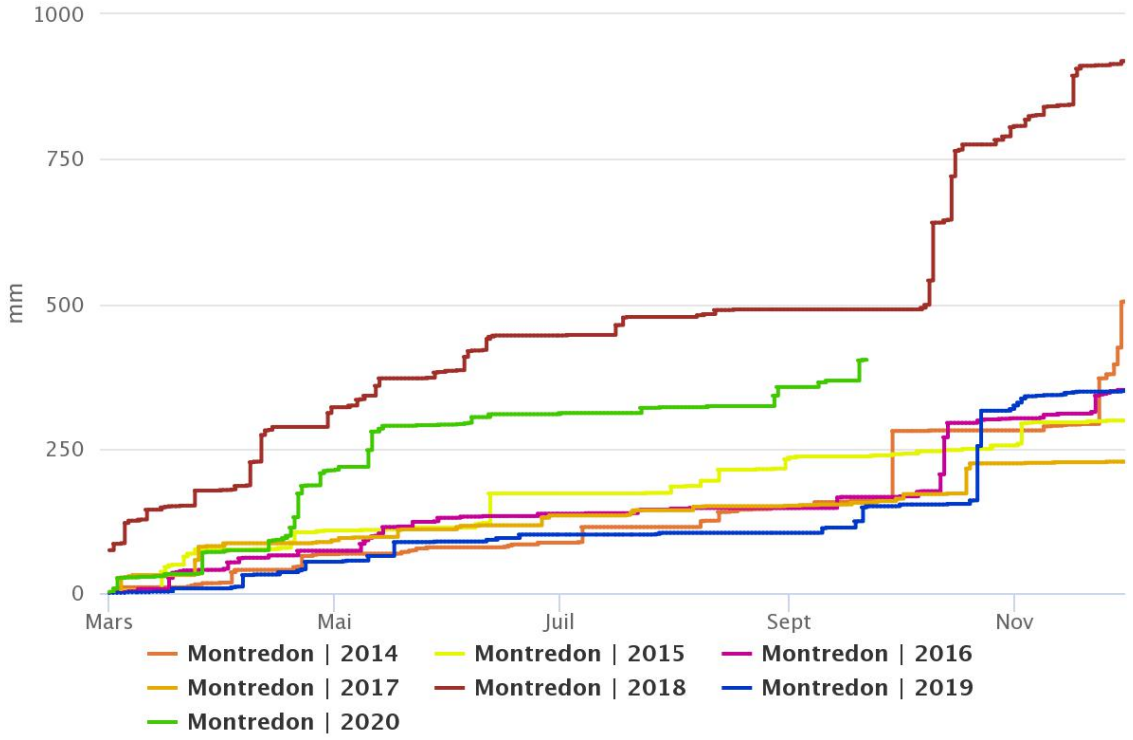


Figure 17 : pluviométrie sur la saison culturale 2020 ; fortes précipitation printanières (station laboratoire Dubernet)

Tableau 7 : Stades phénologiques et degré jours sur la parcelle à l'essai

Stade	Boutons floraux séparés	Floraison	Nouaison	Taille de Pois	Fermeture de Grappe	Véraison	Maturité
Date	15 mai	22 mai	28 mai	04 avril	25 juin	15 juillet	01 septembre
°Jour (Wrinkler)	307	383	445	510	812	1097	1690

Partie 4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Caractérisation des conditions pédoclimatiques, de l'évolution du couvert

a) Caractérisation du millésime 2020

Le printemps 2020 a été particulièrement pluvieux, avec des épisodes intenses et à répétition au mois d'avril et de mai (figure 17). Les excès d'eau dans certains secteurs ont tassé les sols, provoquant momentanément des asphyxies racinaires. Ces conditions partiellement asphyxiantes ont été défavorables à l'assimilation minérale.

En parallèle, les températures élevées (de 3,26°C supérieurs aux normales décennales en Mai) et l'impossibilité de rentrer sur certaines parcelles ont conduit à une forte pression phytosanitaire. Mildiou et oïdium ont été favorisés par ces conditions et par l'absence d'intervention. Les dégâts occasionnés ont pu causer d'importantes pertes de récolte et plus tard diminuer l'efficacité photosynthétique en abîmant le feuillage. Là où la pression phytosanitaire a pu être contenue, les rendements ont été bons avec des baies de bonne taille.

Globalement, les fortes pluies du printemps (283mm entre mars et mai) ont tout de même eu pour conséquence une meilleure disponibilité des éléments minéraux dès le ressuyage des sols engagé.

Ces conditions ont favorisé le développement végétatif des vignes ainsi que leur fonctionnement physiologique jusqu'à tard dans la saison grâce à des situations de confort hydrique exceptionnelle.

Les maturités technologiques ont été rapidement atteintes du fait de ces conditions chaudes. Le manque de pluie en fin de saison a conduit à des situations de stress hydrique sur les parcelles sur sols difficiles (drainants, superficiels, en coteau…).

- **Tendances d'assimilation minérale du millésime**

L'eau et la chaleur du début de millésime ont été favorables à la minéralisation de la matière organique des sols, dont dépend la biodisponibilité de l'azote et du phosphore. Les assimilations minérales sont longtemps restées satisfaisantes grâce à une situation de confort hydrique sur la majorité des secteurs. En témoigne la remontée des niveaux d'azote en milieu de cycle, ce qui est plutôt rare en contexte méditerranéen (figure 16). Cela a généré dans un premier temps l'installation d'un important feuillage, puis un grossissement des baies et un allongement des grappes, et par la suite une bonne accumulation d'azote assimilable.

Les niveaux de Potassium ont d'abord été pénalisés par les conditions d'hydromorphie avant d'augmenter en fin de cycle. Les niveaux sont néanmoins restés modérés.

En revanche, ce millésime n'a pas toujours été favorable à l'assimilation du magnésium. Les niveaux d'assimilation se sont maintenus sur un niveau plus bas que les trois dernières années.

Le fer a été modérément assimilé sur la fin de cycle. La période asphyxiante au printemps a limité son assimilation jusqu'à la taille de pois. Mais on a vu une belle augmentation dès la fermeture de la grappe, aidant à un meilleur potentiel de mises en réserve.

b) Suivi du couvert végétal

De nombreuses repousses de folle avoine (*Avena fatua*) ont colonisé le rang de féverole (figure 18). Les fortes pluies printanières ont participé à l'installation d'adventices.
Des pousses de *Sinapis arvensis L.*, *Geranium rotundifolim L., Sonchus oleraceus L., Chenopodium album L, Cirsium vulgare, Malva sylvestris* ainsi que *Hordeum murinum* ont ainsi été observées (figure 19).

Figure 18 : Evolution du couvert végétal entre avril et mai

Figure 19 : Quelques adventices sur la parcelle au 15 mai

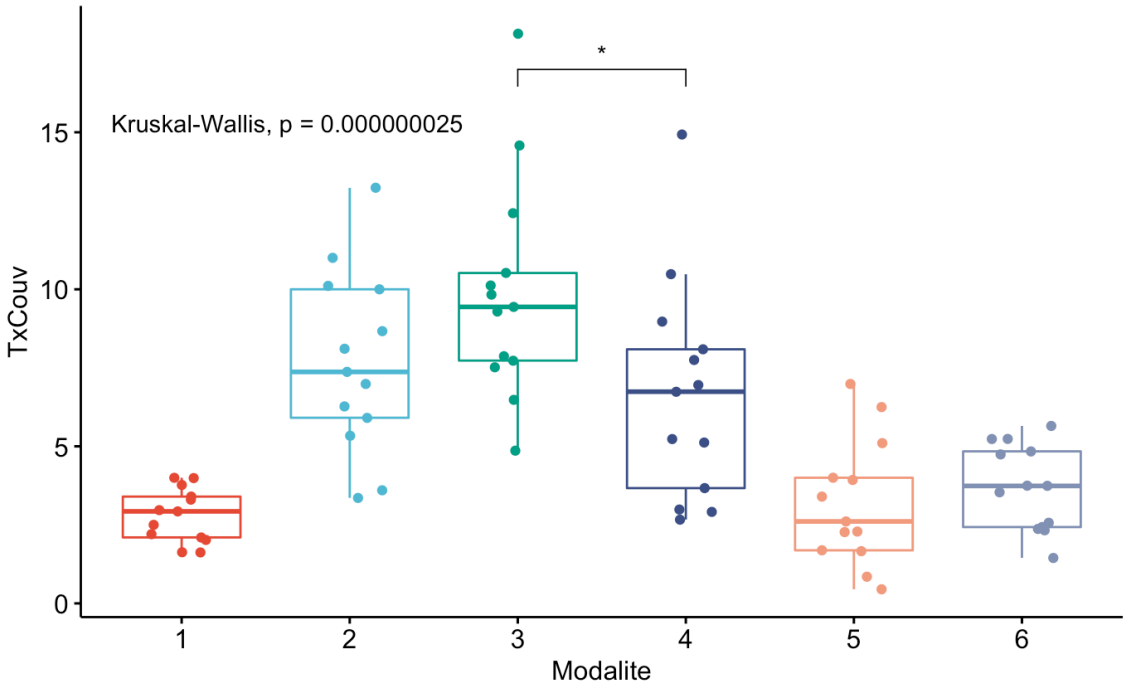


Figure 20 : Taux de couverture du sol par les couverts un mois après destruction

- **Quantification et dynamique de la restitution minérale**

Résultats

Les unités de restitutions potentielles en éléments majeurs des couverts de féverole et de pois, calculées à partir de la méthode MERCI et des prélèvements au 11 mai, sont les suivantes :

Tableau 8 : estimation des restitutions potentielles en éléments majeurs (méthode MERCI v 2.1)

Espèce :	tMS/ha	C/N	U(N) [kg/ha]	U(P) [kg/ha]	U(K) [kg/ha]
Pisum sativum	1,9 *±0,06*	13,1	7 *±3*	0	0
Vicia faba	1,4	10,5	7,5	1,5	15
Total	**3,9 *±0,06***		**14,5 *±3***	**1,5**	**15**

La biomasse est supérieure d'environ 500kg/ha pour le pois. La restitution en azote est légèrement supérieure pour la féverole (0,5 unités). La féverole permet aussi une restitution de 1,5 unités de phosphore et de 15 unités de potassium.

Au total, les 3,9t/ha de couvert détruits ont permis, d'après la méthode MERCI, une restitution totale d'environ **14,5 unités d'azote et 15 unités de potassium**.

Interprétations

La production de biomasse est supérieure pour le pois fourrager, du fait de l'espèce, plus productive que la féverole, mais aussi d'une destruction plus tardive (le 20 mai *vs*. le 28 mars). Les conditions chaudes et pluvieuses du millésime ont permis son bon développement. Il a formé un mulch épais après destruction.

D'après la bibliographie, la dynamique de la restitution azotée est fonction du C/N des couverts (respectivement 13,1 et 10,5 pour le pois et la féverole) mais aussi de leur entretien. La quantité d'azote est plus importante et plus rapidement disponible pour un C/N bas et avec enfouissement/travail du sol (effet « boost » de la minéralisation par l'aération du sol provoquée par le labour).

En l'absence de travail du sol, une plus grande partie des éléments est capitalisée dans la matière organique et peuvent être rétribués plus tardivement.

Nous pouvons donc supposer une restitution rapide et importante sur les modalités 1 et 5 (destruction du couvert, travail du sol puis enfouissement) et au contraire une restitution inférieure et plus lente sur les modalités non-travaillées. La modalité 6 se positionne ici comme intermédiaire avec un rang sur deux travaillé.

- **Taux de couverture du sol par les couverts**

Résultats

Cette partie exploite les données mesurées par Canopeo® sur la biomasse végétale en place 1 mois après destruction des couverts. Les données sont présentées figure 20.

Globalement, la destruction des couverts a été efficace avec une couverture du sol par les adventices tous inférieurs à 10% en moyenne. Le taux de repousse est donc faible.

La repousse d'adventice après destruction est **significativement plus importante** (Wilcoxon, *p-value = 0,026*) sur la modalité 3 (9,91%, destruction **rolofaca**) que sur la 4 (6,65%, **tonte**). Toutefois, le niveau de repousse reste **faible** et les **variations sont de l'ordre de 1 à 6%**.

On peut donc conclure à des **niveaux équivalents de concurrence** pour les ressources.

Le travail du sol et l'enfouissement du couvert (modalités 1, 5 et 6) se sont révélés efficaces, avec un niveau de repousse significativement inférieur aux modalité où le sol n'a pas été travaillé. Le taux de couverture y est d'environ 3%.

Interprétations

Le couvert laissé intact sur la modalité 2 a naturellement séché, d'où une quantité de biomasse fraîche inférieure à la 3 (rolofaca) et la 4 (tonte) sur lesquelles les repousses ont été plus importantes.

La destruction par le rolofaca moins efficace que par la tonte s'explique par son principe de fonctionnement : le « **pincement** » de la végétation est **peu efficace sur les graminées** comme la folle avoine car les tiges sont moins cassantes et épaisses que sur la féverole par exemple. L'efficacité du rolofaca est donc limitée sur ce type de végétation.

- **Activité microbiologique et couverture du sol**

Cette analyse vise à comparer l'activité du sol entre un couvert détruit, un couvert en place et un mulch. Seule les modalités 1 et 2 ont été retenues.

Tableau 9 : Résultats de l'analyse cytométrique sur les échantillons de sol au 25/06/2020

Modalité	Nbr tot micro-organismes [events/ml]	% Morts	% Vivants	% Actifs
Couvert détruit et enfoui *(1 - ConcuMin)*	1,74E+07	53,96	44,84	12,28
Couvert en place *(2 - ConcuMax)*	1,99E+07	44,85	54,52	8,19
Mulch *(IR pois)*	1,71E+07	49,65	48,16	13,12

Résultats (tableau 9)

Le nombre total de micro-organismes est le plus élevé sur la modalité 2 (couvert en place). Il est 16% plus élevé que sous le mulch de pois et 14% plus élevé que sur sol nu et travaillé.
La part d'organismes vivants est aussi plus importante sur la modalité où le couvert est intact (54,5%) contre 44,8% où le sol est travaillé.
Cette biomasse est moins active là où le couvert est en place. Elle est plus active sous le mulch (13,1%). Les différences ne dépassent pas la dizaine de pourcents.

Interprétations

*Ces interprétations sont à nuancer car les proportions de variations entre modalités sont relativement **faibles**.*

La vie microbienne est 14% plus développée là où le couvert est **intact** que là où il est détruit. La conservation de l'écosystème en place et l'absence de passage d'engins peuvent expliquer pour partie ce résultat.

Elle est en revanche 4,9% moins active que sous le mulch, là où les micro-organismes bénéficient sans doute d'une **humidité plus importante**, favorable à leur activité.

Le taux d'organismes actifs supérieurs sur la modalité 1 peut s'expliquer par l'humidité d'un **sol travaillé** (remontée d'eau par capillarité).

Outre le facteur 'humidité', le taux d'organismes actifs supérieurs sur la 1 et le *mulch* peut être attribué à la **dégradation des résidus** : le pois couché (mulch) et le pois enfoui sont des substrats dégradables où se développent peut-être plus les micro-organismes que sur la modalité 2.

c) Assimilations minérales

- **Analyse pétiolaire**

Afin de faciliter la lecture, seul les résultats pertinents dans le cadre de cette étude sont présentés sous forme graphique. Les graphiques pour le phosphore et le potassium sont en annexe 7. L'ensemble des résultats d'analyse pétiolaire sont regroupés sous forme de tableau en annexe 7.

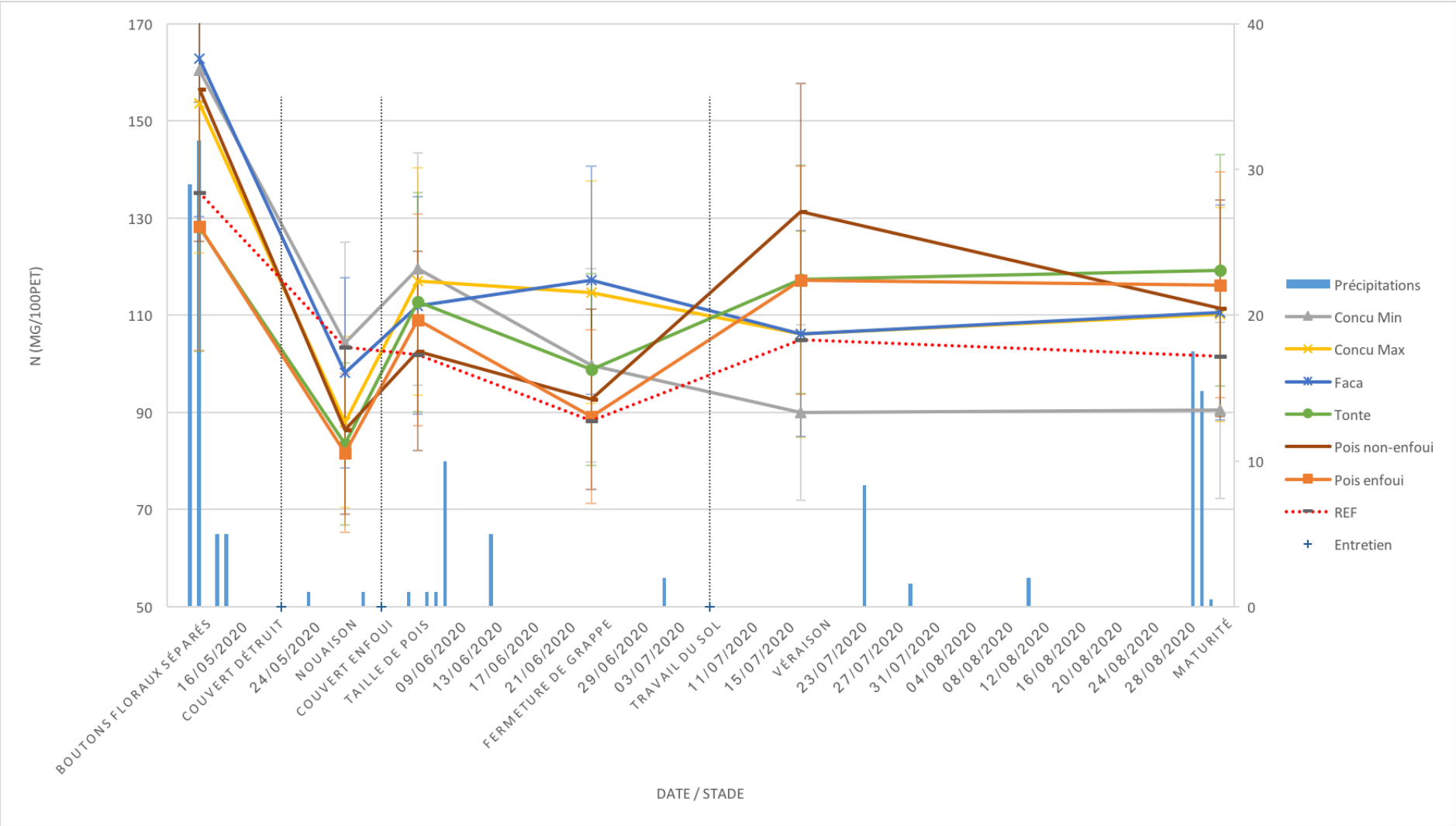


Figure 21 : Dynamique d'assimilation de l'azote sur la parcelle d'essai, comparée au parcellaire de référence SRDV (résultats analyses pétiolaire, en mg/100 pétioles)

Sont reportées sur ce graphique la pluviométrie, les interventions mécaniques (destruction, enfouissement) ainsi que les incertitudes de mesure.

Les assimilations en azote, en phosphore et en potassium (figure 21 et annexe 7) montrent une importante hausse sur la période Nouaison et Taille de Pois sur l'ensemble des modalités (+33%$_N$ pour la 2-Concu Max et +52%$_P$ sur la modalité 4-Tonte, et +83% $_K$ sur la 4 entre BFS et TdP).

Le cycle d'assimilation du phosphore et de l'azote comprennent un pic d'assimilation à cette période (Champagnol, 1984). Par ailleurs, cette période correspond au ressuyage après les fortes pluies.

Mais l'assimilation du parcellaire de référence (courbe en pointillés rouge) ne suit pas cette dynamique. Il ne s'agit donc **pas seulement d'un effet millésime**.

Par conséquent, cette augmentation est, au moins en partie, attribuable à la **restitution** de l'azote, du phosphore et du potassium capturés par les couverts au cours de leur cycle. Il s'agirait plutôt de la restitution par la féverole, soit 4-5 semaines après destruction (28 mars) ce qui rejoindrait les observations faites par (Patrick et al., 2004) sur la restitution azoté des couverts.

La comparaison des modalités (5-Pois enfoui) et (6-Pois non-enfoui) entre nouaison et taille de pois, autrement dit après le premier travail du sol, rejoint les hypothèses faites sur la minéralisation et la restitution des couverts :

- Elle est plus rapide avec le travail du sol (+34%$_N$ sur la modalité 5, effet « boost » de la minéralisation par le travail du sol).
- Elle est plus progressive avec un rang sur deux non-travaillé (19%$_N$ sur modalité 6). Une partie est capitalisée dans la MO et restituée plus tard (12% supérieur à véraison).

Néanmoins, cela n'est pas le cas entre la 1 (sol travaillé) et la 2 (sol non-travaillé). Il n'est donc pas possible de confirmer les hypothèses faites sur la restitution.

Plus tard dans le cycle (autour de fermeture de grappe), les assimilations en phosphore et en potassium (annexe 7) sont supérieures sur les modalités où le sol n'est pas travaillé. Or, l'assimilation des éléments minéraux étant dépendantes de leur mise en solution dans le sol, on peut faire l'hypothèse d'une humidité plus importante dans les sols où subsistent les couverts végétaux. Cela rejoindrait les observations de (Gaudin et al., 2010; Morlat and Jacquet, 2003; Wassenaar et al., 2005) sur la meilleure **infiltration et rétention de l'eau** en présence de couverts végétaux. S'agissant d'un millésime pluvieux, cet effet a été particulièrement important.

Les importantes assimilations en potassium ont conduit à des niveaux de potassium dans les moûts relativement élevés (autour de 1600mg/L, cf. annexe 6).

Enfin, il faut rappeler que les différences ne sont pas significatives et ne permettent pas d'affirmer les hypothèses qui viennent d'être formulées. Il s'agit plutôt de pistes d'interprétations.

4.2 Vigueur et statut hydrique

a) Mesures liées à la vigueur et à la canopée

- **Elongation des rameaux**

La vitesse d'élongation des rameaux augmente notablement entre taille de pois et fermeture de grappe (annexe 8).

La visualisation des données rend compte d'une forte hétérogénéité des valeurs entre les stades. La lecture des valeurs est donc peu pertinente, d'où un référencement en annexe.

Il n'y a pas de différence significative dans la pousse des rameaux entre modalités (Kruskal-Wallis, p-value = 0,4771).

- **Surface foliaire :**

Les mesures de SECV/m^2 sur la canopée montrent de légères différences significatives entre modalités. Ces différences sont de l'ordre de 0,3m^2/m^2, autrement dit de quelques pourcents. La visualisation des données (figure 22) montre par ailleurs une forte **hétérogénéité au sein même des modalités**. Les mesures sur la canopée ne fournissent donc pas d'informations suffisamment discriminantes pour conclure à une différence entre modalité.

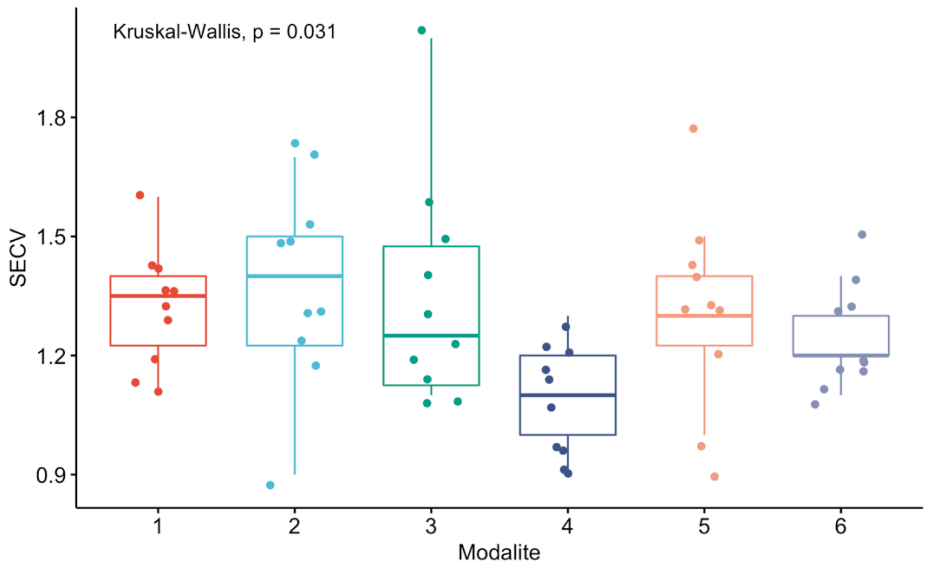
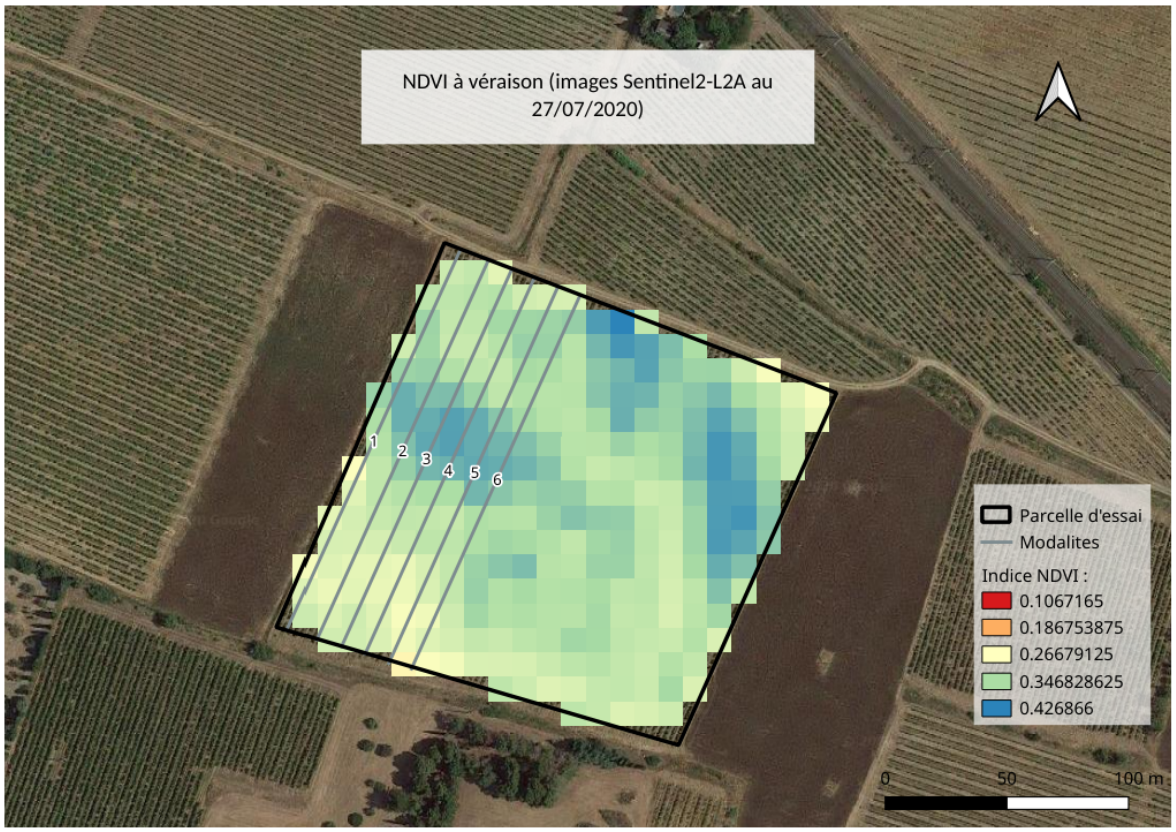


Figure 22 : Boxplot des mesures de SECV/m2 des différentes modalités

Tableau 10 : Evolution de l'indice NDVI au cours du cycle

Date - Stade :	27 mai - Nouaison	21 juin - Fermeture de la grappe	27 juillet - Véraison	25 août - Maturité
NDVI moyen	0,427	0,396	0,340	0,357



Carte 1 : Carte NDVI de la parcelle d'essai à véraison ; précision ±5m

- **Cartographie et évolution de l'indice NDVI**

La cartographie NDVI (carte 1) met en évidence des zones d'hétérogénéité intra-parcellaire. La zone ouest est plus vigoureuse, avec d'importantes zones d'hétérogénéité, raison pour laquelle elle a été écartée de l'essai.

Cette carte met aussi en évidence un gradient de vigueur au sein des rangs de l'essai. On distingue en effet une **zone centrale plus vigoureuse** qu'en bordure.

Cette hétérogénéité doit venir nuancer les affirmations relevant des différences dans les niveaux de vigueur entre modalités. Elle explique par ailleurs une partie de **l'hétérogénéité** des **mesures** au sein des modalités.

L'évolution de l'indice NDVI (tableau 10) montre une baisse en cours de cycle puis une augmentation entre Véraison et Maturité. Cette baisse est principalement liée à l'asséchement des couverts, compris dans le calcul de l'indice. Le maintien voire l'augmentation sur le reste du cycle est attribuable à la mise en route de l'irrigation qui permet de maintenir un niveau de vigueur satisfaisant.

- **N-Tester :**

Il n'y a pas de différence significative entre modalités pour les valeurs du N-Tester (ANOVA, *p-value = 0,414*, tableau 11).

b) Mesures liées à l'état hydrique

- **Potentiel hydrique foliaire de tige**

Résultats

Au 21 août, le potentiel de tige sur la modalité 2 est significativement plus faible que sur les autres modalités. Cela rejoint les indices DeltaC13 (annexe 6), légèrement plus faible (0,2 point) sur la 2.

Ce potentiel de tige est en moyenne de -1,59MPa (contrainte hydrique sévère) contre -1,16MPa (contrainte hydrique modérée) pour la modalité 1, la plus basse.

Les modalités 1 et 5 (sols travaillés tous les inter-rangs), ont des valeurs de potentiels de tige significativement inférieurs aux autres.

Le potentiel hydrique foliaire de tige est significativement plus fort sur la 4 (1,49MPa) que sur la 3 (1,34MPa) (Kruskal-Wallis, *p-value=0,0087*).

Il est aussi significativement plus fort sur la 5 (1,18MPa) que sur la 6 (1,36MPa).

Interprétations

La différence de potentiel hydrique foliaire de tige est importante en période estivale entre la modalité 2 (pas d'irrigation, couvert intact), la 3,4 et 6 (couvert non-enfoui) et les modalités 1 et 5 (sol nu et travaillé).

Il y a effectivement compétition pour la ressource hydrique entre les vignes et les couverts (Celette et al., 2009), même pour des valeurs de biomasse fraîche de dépassant pas 10% après repousse. L'effet de remontée d'humidité par capillarité, attribuable au **travail du sol**, a sans doute **favorisé l'alimentation hydrique** des modalités où le sol est travaillé (1 et 5).

Sur la modalité 2, le stress hydrique sévère n'est pas attribuable à la présence d'un couvert – sec à cette période – mais plutôt à **l'absence d'irrigation**.

Malgré une repousse légèrement plus importante sur la 3, le stress hydrique est moins fort sur cette modalité que sur la 4.

L'effet **« d'agressivité » des repousses sur la ressource hydrique peut donc être négligée** (Tan and Crabtree, 1990; Thomas and Archambeaud, **2013)**. Un effet « mulch » sur la 3, qui conserverait l'humidité du sol, pourrait expliquer cette différence mais aucune mesure ne permet de le confirmer.

- **Indice d'arrêt de croissance**

Le suivi de l'indice d'arrêt de croissance des apex apporte peu d'informations car l'hétérogénéité des mesures est forte (cf. figure 24).

Tableau 11 : Données issues des mesures au N-Tester

modalité	**moyenne**	*écart-type*
1	435,4	*32*
2	441,5	*37*
3	442,4	*27*
4	419,9	*34*
5	419,5	*36*
6	438,5	*29*

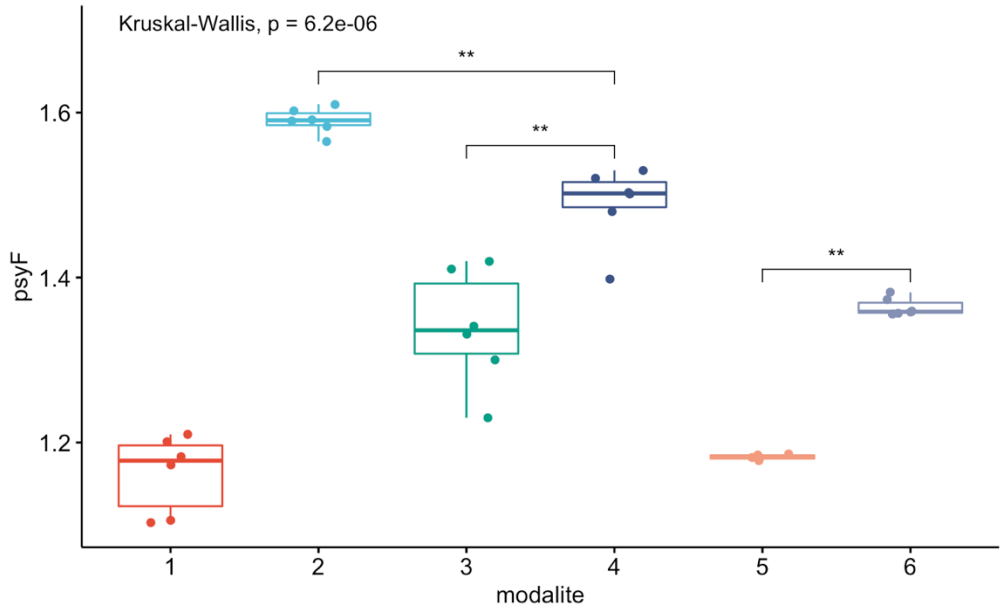


Figure 23 : Potentiels de tige par modalité au 21 août 2020

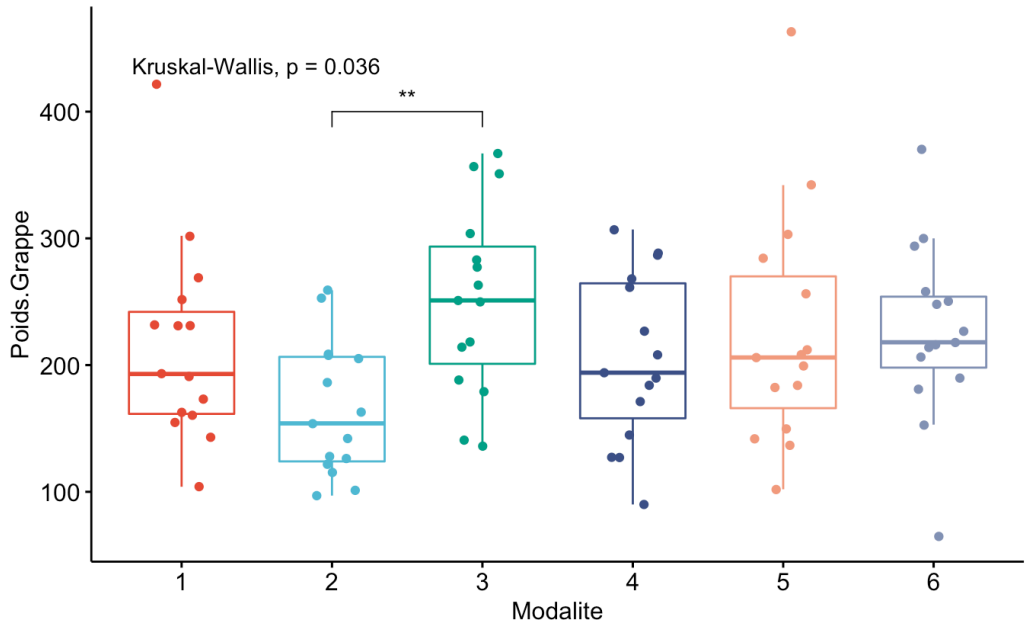


Figure 24 : Poids des grappes en fonction des modalités de l'essai

c) Rendement

Résultats

Le poids des grappes a été mesuré sur 15 grappes le 1er septembre et les résultats sont présentés figure 28.

Le poids des grappes est le plus faible pour la modalité 2 (164,5g) et le plus fort sur la modalité 3 (251,9g). On constate une différence significative de 87g entre ces modalités (Wilcoxon, *p-value = 0,0012*).

L'estimation des rendements par modalité révèle un rendement inférieur pour la modalité 2 (concurrence maximale), du fait de grappes moins grosses et d'un nombre de grappes inférieur.

Interprétations

Le poids des grappes est inférieur en moyenne sur la 2, sans doute à cause de l'absence d'irrigation. La plus forte contrainte hydrique a pu **limiter le grossissement et le poids des baies** (Ojeda, 1999).

En ce qui concerne l'estimation de rendement, **l'interprétation** des résultats est **limitée**. Les composantes principales du rendement (nombre de grappes) s'élaborent en année **n-1** (température, azote et eau autour de floraison d'après (Eltom et al., 2017)) Le poids des grappes, lui, est bien lié au millésime. L'assimilation azotée et hydrique lors de la croissance herbacée (de la fleur à véraison) impactent positivement le rendement en année **n** en favorisant la multiplication puis la croissance des cellules de la baie (Deloire et al., 2004). S'agissant du poids des grappes, la modalité 3 est la plus élevée. Or elle bénéficie d'une contrainte hydrique modérée (-1,34MPa) et d'une assimilation azotée importante en période de croissance herbacée (figure 21 p.42). Ces facteurs ont pu conduire à un poids des grappes supérieurs, ce qui rejoindrait la bibliographie.

4.3 Mise en relation avec les autres indicateurs viticoles et œnologiques

Une ACP a été réalisée pour confronter les différents indicateurs afin d'établir des liens éventuels entre eux.

L'éboulis de valeur propre est moyen, et les 2 premières dimensions expliquent 69% des différences entre individus. Les indices N-Tester et SECV/m2 apportent peu d'informations.

La représentation des individus dans le plan (figure 26) montre que les modalités proches sur la parcelle sont assez similaires entre elles (1 et 2, 3 et 4, 5 et 6). On distingue bien les groupes de modalités mises en place et comparées deux à deux.

Tableau 12 : Eboulis de valeurs propres

	Dim.1	**Dim.2**	**Dim.3**	**Dim.4**	**Dim.5**
Variance	7,87	5,88	3,22	1,60	1,44
% de variance	*39,36*	*29,38*	*16,10*	*7,98*	*7,17*
%var. cumulée	***39,36***	***68,74***	***84,85***	***92,83***	***100***

- **Cercle de corrélations**

Le cercle de corrélation (figure 25) permet d'apporter quelques pistes de réflexion :

Restitutions et dynamique d'assimilation

La biodisponibilité du phosphore et de l'azote est très liée à la minéralisation de la matière organique. D'après le cercle de corrélation, le taux de couverture du sol est corrélé à l'assimilation du phosphore tout au long du cycle. Le maintien d'un couvert semble donc favorable à l'activité de minéralisation de la MO du sol, et par conséquent bénéfique à l'absorption du Phosphore. Le taux de couverture semble aussi corrélé à une meilleure absorption d'azote et de potassium à fermeture de grappe.

Tableau 13 : Poids moyen des grappes par modalité et estimations de rendement

modalité	Poids des grappes moyens [g]	Estimation de rendement [t/ha]
1	214,7 *±78,0*	11,3
2	164,5 *±52,8*	7,1
3	251,9 *±73,8*	11,1
4	204,9 *±66,8*	10,6
5	224,7 *±93,1*	11,5
6	226,0 *±69,8*	11,4

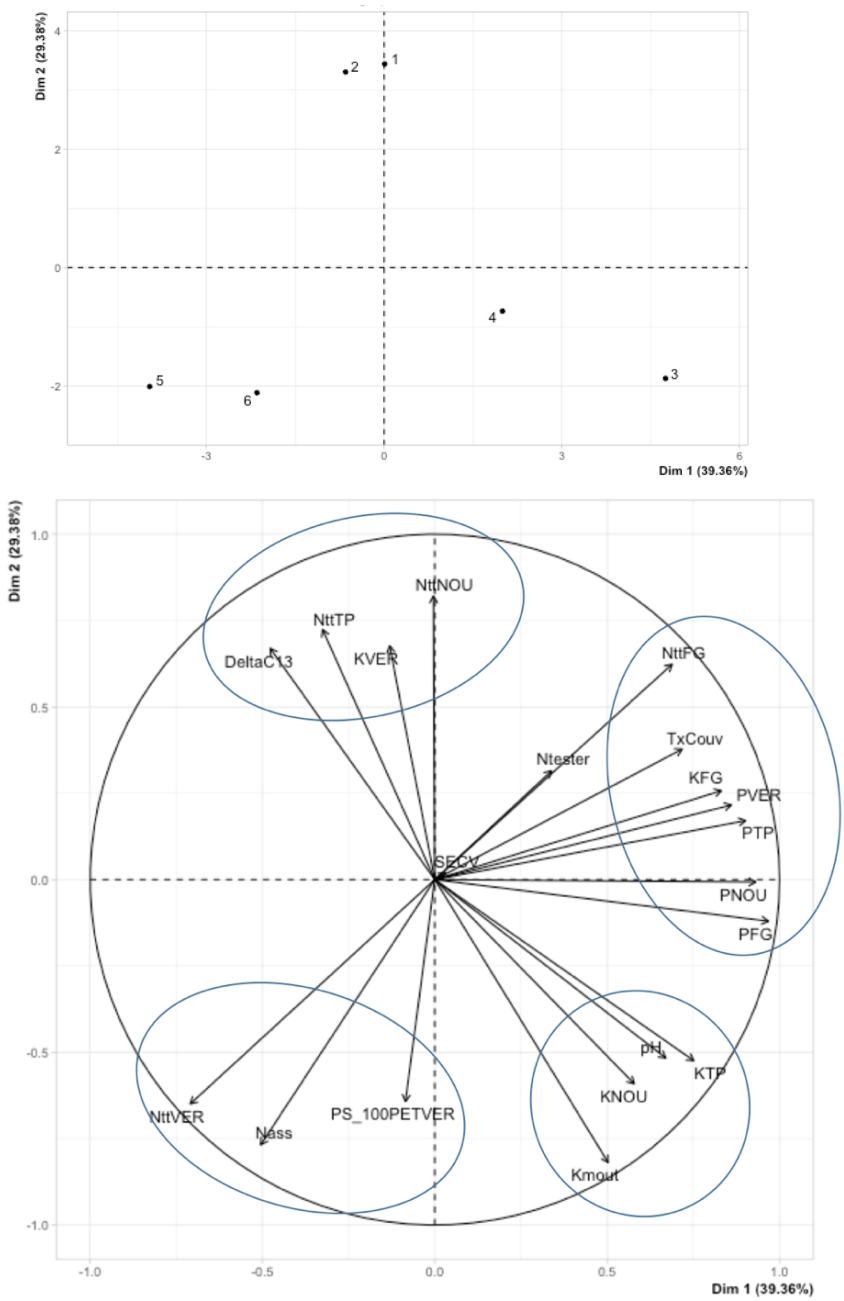


Figure 25 : Cercle des corrélations et graphique des individus de l'ACP

Assimilations et données sur moût

L'accumulation de potassium dans le moût semble liée à son assimilation printanière, autour de taille de pois et nouaison. Cela rejoint la littérature (Mpelasoka et al., 2003).

Le potassium est le cation majeur des moûts. Le pH augmente donc avec la teneur en potassium.

L'assimilation du potassium à véraison (Kver) est corrélée avec l'indice DeltaC13. Cela rejoint les observations faites sur le phénomène de décharge potassique en situation de stress hydrique (Deloire et al., 2006; Ojeda et al., 2002). La Syrah et les autres cépages septentrionaux cultivés dans leur limite climatique basse (régions chaudes) y sont particulièrement sensibles.

Le statut azoté à véraison (azote pétiolaire, azote assimilable des moûts et poids des pétioles) semble anti-corrélé au taux de couverture. L'azote a pu être plus disponible en fin de cycle sur les modalités où le couvert a été détruit et le sol travaillé. C'est d'ailleurs sur ces modalités que le potentiel de tige est le plus bas, bien que l'indice DeltaC13 ne rejoigne pas ces observations.

On retrouve dans le cercle de corrélation le lien entre l'assimilation azotée à véraison et l'accumulation d'azote assimilable dans les moûts, largement étudiée pour son intérêt dans la fermentescibilité des moûts et pour l'obtention de vins au profil thiolé.

- **Matrice de corrélation :**

Vigueur et mildiou

Etant donnée la forte pression mildiou du millésime, la fréquence d'attaque du mildiou sur grappe a été calculée au 12 juin à partir d'un comptage sur 10 ceps par modalités.

La matrice de corrélation (figure 27) permet d'interpréter ces résultats : la fréquence d'attaque de **mildiou** sur grappes est fortement corrélée aux poids sec de 100 pétioles, qui traduit le niveau de **vigueur**, et au SECV/m2, autrement dit au développement de la **canopée** qu'on peut relier à **l'entassement** de végétation (les coefficients de pearson sont respectivement égaux à 0,71 et 0,77). Cela rejoint (Valdés-Gómez et al., 2011) sur le lien entre vigueur et sensibilité aux maladies cryptogamiques.
Les p-value montrent toutefois que ces valeurs ne sont significatives.

Un lien entre le taux de couverture et le taux de mildiou sur grappes peut aussi s'établir (Pearson = 0,68, *p-value =0,13 > 0,05*). Cela va à l'encontre des observations faisant état d'une moindre sensibilité en situation d'enherbement, liée à une diminution de la vigueur (Valdés-Gómez et al., 2011). Ici aussi, la p-value n'est pas significative.

Aucun lien ne peut être fait entre statut azoté et virulence du mildiou (Pearson = -0,64).

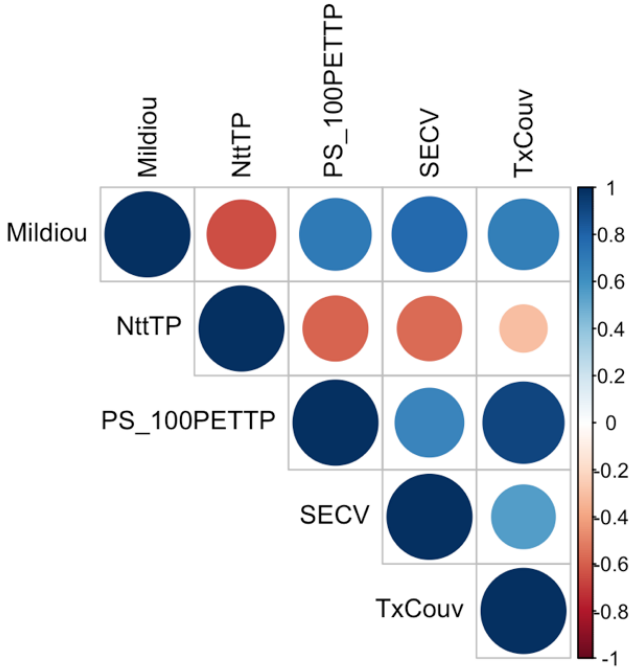


Figure 26 : Matrice de corrélation liant les indices de vigueur, le statut azoté, le taux de couverture du sol et le taux de mildiou sur grappe

Partie 5 LIMITES, PERSPECTIVES ET CONCLUSION DE CETTE ETUDE

5.1 Limites à l'interprétation des résultats et perspectives

a) Limites

Plusieurs limites à l'interprétation des résultats de cette étude peuvent être soulevés.

Premièrement s'agissant de facteurs climatiques :

Le millésime 2020 a été exceptionnellement **pluvieux** au printemps. La situation de confort hydrique prolongé sur la parcelle d'essai a pu limiter l'effet attendu de concurrence hydrique et azotée entre le couvert et la vigne (Celette et al., 2005). D'autant plus que, comme le montre le suivi du parcellaire de référence SRDV, le millésime 2020 a été favorable à l'assimilation de l'azote.

Une partie de l'azote rétribué par le couvert après sa destruction a pu être soumis à lessivage. Les conditions pluvieuses qui ont suivi la destruction précoce de la féverole ont pu limiter la quantité d'azote disponible pour la vigne en lessivant une partie de l'azote restitué.

Ces conditions ont aussi conduit à des attaques de mildiou. Les effets (diminution de l'efficacité du feuillage, compensation au niveau des grappes, diminution du rendement) ont pu modifier le fonctionnement physiologique des vignes et ce de manière hétérogène au sein de la parcelle, et ce faisant, biaiser les mesures.

Deuxièmement : la cartographie NDVI, les mesures sur les rameaux ainsi que les observations sur place ont mis en évidence une **hétérogénéité** de vigueur au sein des modalités de l'expérimentation.
Cette hétérogénéité peut pour partie expliquer que les résultats des mesures sur la canopée ne soient par corrélés (tableaux 15 et 16).
La SECV a finalement été préférée comme mesure de canopée car plus complexe dans son protocole et donc supposément plus fidèle à la réalité.

Cette hétérogénéité a, couplée à des casses, aux incertitudes de mesure et aux rognages successifs, limité l'interprétation des résultats sur l'élongation des rameaux. Les disparités entre mesures rendent peu exploitables ces données et ont conduit à se tourner tardivement vers l'indice d'élongation des entrenœuds.

Le suivi du couvert a été impossible dans un premier temps (avril-début mai) pour cause de confinement (épidémie de Covid-19). La biomasse de féverole avant destruction n'a pas pu être mesurée et a dû être **estimée**.
D'autre part, l'estimation du poids du *pisum sativa L.* par la biomasse fraîche est moins précise qu'à **l'étuve**. Les quantités d'unités restituées sont donc moins précises.

Autre limite à cette étude : le protocole aurait pu inclure une modalité avec un **contrôle total** de l'herbe. C'est-à-dire sans couvert végétal, soit sans aucune concurrence hydrique et azotée et sans restitution minérale. Cela aurait permis de mieux distinguer des effets attribuables à la présence d'un couvert.

Sur le long terme, il aurait aussi été possible d'évaluer le gain en matière organique permise par l'enherbement. Néanmoins, ces effets sont déjà étudié (Fourie, 2012) et n'étaient pas forcément pertinent de les inclure au protocole.

La parcelle à l'essai est déjà équilibrée et fertile (cf. analyses de sol). Elle est conduite depuis longtemps (15 ans) avec des couverts et régulièrement fertilisée. La « marge de progression » avec des couverts végétaux était donc limitée vis-à-vis de la nutrition ou de la vie du sol. L'implantation de couvert sur une parcelle historiquement conduite sans herbe aurait permis de mesurer une progression de facteurs comme les stocks d'azote, la MO, la CEC. En revanche cela nécessite de mettre en place un essai sur le long terme.

Tableau 14 : Synthèse des calculs sur les indices foliaires. Les lettres indiquent des différences significatives au seuil de 5% (Tukey HSD)

	LAIe		**SECV/m2**		**SFT (m2/rameau)**	
modalité	moyenne	*écart-type*	moyenne	*écart-type*	moyenne	*écart-type*
1	1,93	*0,60*	1,32	*0,15*	1,17ab	*0,40*
2	2,14	*0,68*	1,38	*0,25*	1,10a	*0,31*
3	2,38	*0,45*	1,35	*0,29*	1,36ab	*0,31*
4	1,67	*0,60*	1,09	*0,14*	1,42ab	*0,51*
5	2,66	*1,06*	1,31	*0,25*	1,61b	*0,39*
6	2,15	*0,61*	1,25	*0,13*	1,48ab	*0,34*

Tableau 15 : Matrice de corrélation de Pearson entre les indicateurs de canopée

	LAIe	**SECV**	**SFT**
LAIe	1.0000	0.3794	0.0422
SECV		1.0000	0.1635
SFT			1.0000

La **précision** de la cartographie **NDVI** à 5 mètres ne permet pas de « descendre » à l'échelle du cep de vigne. Cette méthode n'apporte donc pas d'informations individuelle (taux de manquant, indice NDVI/modalité) mais une vision globale de la parcelle.

Enfin, des mesures de mises en réserves (analyse de sarments) auraient permis d'évaluer un éventuel impact de l'enherbement post-récolte. La minéralisation est très active en automne (pluviométrie importante et sols encore chauds) et la concurrence d'un enherbement pourrait impacter les mises en réserves de la plante (potentiel énergétique, amidon, oligo-élements…).

b) Perspectives

Les recherches bibliographiques ainsi que les résultats de cette étude offrent plusieurs perspectives :

Premièrement, l'ensemble des services et dysservices de l'enherbement rassemblés par la bibliographie constituent une **base solide** pour élaborer des règles de décision et des conseils : choix de l'espèce, pilotage du couvert…

- Par exemple, l'accès à l'irrigation (concurrence hydrique du couvert « compensée » par l'irrigation) peut amener à préférer un couvert permanent d'espèces annuelles à re-semis. Ce couvert fournira plus de biomasse, de la portance et reste facile d'entretien (tonte, semis tous les 3-4 ans seulement…).

Deuxièmement, la connaissance de l'aspect nutritif et concurrentiel a un intérêt dans le conseil :

Azote et eau

- La concurrence précoce pour l'azote entre le couvert et la vigne peut conduire à décider d'une **compensation précoce par apport foliaire**.

Cette décision doit être nuancée par la lecture des données pétiolaires en début de millésime (à BFS), des mises en réserves, de la recharge en eau des sols, de l'historique de la parcelle et des objectifs produits. Cela revient à préférer des services comme le gain de MO, de portance et de structure du sol et de contrebalancer l'effet négatif de concurrence azotée.

- En situation de sensibilité à la battance (sol limoneux) et de manque de structure, le conseil peut s'orienter vers des crucifères (moutarde blanche, radis fourrager *etc.*).

Par l'ACP et les mesures de potentiel hydrique foliaire de tige, cette étude a montré une concurrence hydrique et azotée du couvert autour de véraison. Cette concurrence peut entrainer une diminution des niveaux d'azote assimilable.

- Là aussi la décision d'une correction en foliaire/fertirrigation peut être prise selon la lecture des données pétiolaire à véraison, les conditions du millésime, les objectifs produits (thiols)…

Par exemple : l'assimilation azotée en fin de cycle ne doit pas être trop importante pour la production de grands vins rouges (concentration des anthocyanes…), et la contrainte hydrique doit être modérée sans pour autant être sévère (Ojeda et al., 2002).

L'implantation d'un couvert concurrentiel (fétuque élevée, ray-grass *etc.*) peut donc, dans certains cas, permettre de diminuer une vigueur excessive et favoriser la production de vins rouges concentrés.

A l'inverse, une trop forte concurrence peut conduire à des corrections en cave (azote assimilable trop faible, fermentations languissantes).

- Dans le cas de difficultés à la minéralisation de la parcelle (faibles assimilations en azote, faibles niveau de MO, C/N élevé, manque de vigueur), il est donc envisageable de recommander l'implantation d'un couvert à base de légumineuses pour participer à corriger ces valeurs azotées en parallèle d'une stratégie de fertilisation adaptée.

- Enfin, durant la saison, le travail du sol et la destruction du couvert peuvent être préconisés pour relancer l'assimilation azotée si elle est constatée comme trop basse.

Phosphore

Le phosphore est essentiel au fonctionnement énergétique des plantes (molécules d'ATP, ADP). Il est décisif en début de cycle pour l'induction racinaire. Or les résultats de cet essai ont montré une corrélation entre le taux de couverture et l'assimilation du phosphore au cours du cycle.

- Dans le cas de faibles assimilations en phosphore et de faibles taux de MO, l'implantation d'un couvert peut tout à fait être suggérée.

Potassium

Le potassium est un élément phare dans l'approche agro-œnologique de la SRDV. Pour des cépages septentrionaux cultivés en climats méridionaux, son assimilation peut être excédentaire et conduire à des décharges potassiques, des carences magnésiennes, un pH élevé et donc une perte de fraîcheur et une moindre stabilité des vins.

Le pH des vins est pour partie conditionné par l'assimilation potassique en milieu de cycle. Or, cette étude a montré une restitution du potassium à cette période pour des couverts détruits fin mars (féverole) et fin mai (pois).

- La destruction du couvert autour de la floraison pourrait entraîner un apport de potassium non-désiré si l'on recherche des pH plus bas et plus de fraîcheur dans les vins. Cette observation reste à vérifier sur plusieurs études et dans d'autres situations.

Outils de destruction

Cette étude a mis en évidence une efficacité de destruction supérieure de la tonte par rapport au rolofaca sur une graminée (folle avoine).

- Le conseil d'outil de destruction doit donc intégrer l'espèce à détruire et sa biomasse pour maximiser l'efficacité de la destruction.

Autres

Cette étude n'a pas révélé d'influence significative entre les attaques de mildiou et le développement du couvert. Son impact sur la vigueur peut en revanche permettre de diminuer la sensibilité de la vigne aux maladies (Valdés-Gómez et al., 2011), ce qui n'a pas été vérifié ici. Cette étude ne relève aucun lien entre statut azoté et sensibilité aux maladies.

Le conseil apporté actuellement préconise de ne pas travailler le sol en situation de sensibilité importante aux maladies (pour éviter une remontée d'humidité).
Le lien entre humidité du couvert et maladie n'étant pas avéré, il ne semble pas obligatoire de détruire un couvert avant un pic de contamination.

La portance apportée par un couvert végétal peut être déterminant en cas de fortes pluies. Cela s'est avéré être crucial cette année où il a été parfois très difficile de rentrer sur les parcelles après les pluies, et donc impossible de protéger les vignes.

- Cet argument économique peut être évoqué lors de la présentation de l'intérêt de l'enherbement.

Enfin, la cytométrie en flux appliquée à la mesure des organismes vivants dans les échantillons de sol pourrait être un outil d'avenir dans l'évaluation de la vie du sol et de l'effet des couverts. A l'avenir, elle pourrait être intégrée dans des protocoles visant à mesurer l'impact de différentes modalités sur la biodiversité et l'activité du sol.

5.2 Conclusion

L'influence des couverts et de leur entretien sur l'alimentation minérale des vignes est multifactorielle et complexe à appréhender. L'isolement de l'influence seule du couvert est difficile car des éléments climatiques, pédologiques *etc.* entrent en jeu.

Certains points comme la concurrence hydrique et l'impact sur le rendement ont déjà été largement étudiés.

Le protocole mis en œuvre dans cette étude avait pour objectif d'étudier l'influence isolée de certains de ces facteurs comme le mode de destruction et l'intensité de concurrence pour les ressources.

Si les conditions climatiques et les dégâts de mildiou lors de cette étude ont conduit à une moindre discrimination des effets de concurrence pour les ressources et a une hétérogénéité intra-parcellaire, il a toutefois été possible de tirer quelques conclusions. Des effets de restitution minérales et leur *timing* ont pu être observés, ainsi qu'une concurrence pour l'eau.

Un millésime comme 2020, très pluvieux au printemps, a aussi mis en avant l'intérêt de la portance permise par les couverts pour pouvoir rentrer dans les parcelles. Enfin, les résultats de cytométrie en flux ont attesté d'une importante vie du sol grâce aux couverts.

Il reste beaucoup à faire pour améliorer le conseil apporté à ceux qui souhaitent mettre en place des couverts végétaux, dans la définition de la stratégie et des services attendus, et par les décisions techniques permettant d'y répondre. Le choix des espèces et de techniques est large et l'accompagnement doit s'ajuster sans impacter négativement les résultats de l'exploitant.

Il reste aussi à faire entendre les nombreux intérêts des couverts pour voir adopter cette pratique au sein d'une profession parfois réticente, qui fait pourtant face à des problèmes récurrents de perte de matière organique et d'érosion des sols.

La viticulture rencontre actuellement de nombreux défis, et le maintien de la qualité des sols sera primordial pour les relever. Les thématiques de conservation des sols et d'agrooenologie sont des pistes qui doivent être poursuivies pour améliorer durablement l'impact de la culture viticole sur les terres.

L'enherbement est une pratique qui s'inscrit dans cette dynamique et sa mise en place doit être encouragée. Les activités de conseil joueront un rôle primordial dans ces changements.

Partie 6 BIBLIOGRAPHIE

Thèses et rapports :

Couderc, J., 2015. Méthodologie de caractérisation de la nutrition minérale afin d'optimiser la fertilisation des vignobles languedociens.

FranceAgriMer, 2018. Les chiffres clés de la filière viti-vinicole Française.

Frey, P.H., 2016. Analyse des pratiques d'enherbement des viticulteurs et formalisation des règles de décision utilisées pour le pilotage.

Meziere, D., Gary, C., Barbier, J.M., Bernos, L., Clement, C., Constant, N., Deliere, L., Forget, D., GROSMAN, J., Molot, B., 2009. Ecophyto R&D. Vers des systèmes de culture économes en pesticides. Volet 1. Tome III: analyse comparative de différents systèmes en viticulture. Ecophyto R&D. Vers des systèmes de culture économes en pesticides. Volet 1. Tome III: analyse comparative de différents systèmes en viticulture (2009).

Ojeda, H., 1999. Influence de la contrainte hydrique sur la croissance du pericarpe et sur l'evolution des phenols des baies de raisin (Vitis vinifera L.) cv. Syrah. École nationale supérieure agronomique (Montpellier).

Silva, P., 2002. Etude écophysiologique des terroirs de St-Christol : étude du carignan sur deux porte-greffes différents. Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier.

Page Web :

Gontier, L., 2020. Les engrais verts en viticulture. IFV Occitanie. URL https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/les-engrais-verts-en-viticulture-2/ (accessed 4.14.20).

IFV, O., 2020a. La matière organique. IFV Occitanie. URL https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/la-matiere-organique/ (accessed 4.15.20).

IFV, O., 2020b. Méthode des apex. IFV Occitanie. URL https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/methode-des-apex/ (accessed 9.17.20).

IFV, O., n.d. Mesure du potentiel hydrique foliaire de tige. IFV Occitanie. URL https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/mesure-du-potentiel-hydrique-foliaire-de-tige/ (accessed 9.17.20).

Ouvrages :

Atallah, T., Lopez-Real, J., 1991. Potential of green manure species in recycling nitrogen, phosphorus and potassium. Biological Agriculture & Horticulture 8, 53–65.

Baize, D., Girard, M.-C., 2008. Référentiel pédologique. Editions Quae, Paris.

Boutin, F., 2003. Les engrais verts en viticulture.

Branas, J., Bernon, G., Levadoux, L., 1946. Éléments de viticulture générale. impr. Delmas, Montpellier, France.

Carbonneau, A., Deloire, A., Torregrosa, L., Jaillard, B., Pellegrino, A., Metay, A., Ojeda, H., Lebon, E., Abbal, P., 2015. Traité de la vigne: physiologie, terroir, culture.

Champagnol, F., 1984. Elements of the physiology of the vine and of general viticulture., Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. F. Champagnol.

Delas, J., 2000. La connaissance de la plante. Fertilisation de la vigne, Éditions Féret, Bordeaux, France. pp 21–44.

Galet, P., 1998. Grape varieties and rootstock varieties. Oenoplurimédia.

Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W., 2010. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. PPUR Presses polytechniques.

Marschner, H., 2011. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. Presented at the Symposia of the society for experimental biology, Cambridge University Press (CUP) Cambridge, pp. 205–234.

Morot-Gaudry, J.-F., 1997. Assimilation de l'azote chez les plantes: aspects physiologique, biochimique et moléculaire. Editions Quae.

Reynier, A., 2012. Manuel de viticulture: guide technique du viticulteur. Tec & Doc, Paris.

Team, R.C., 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.

Thomas, F., Archambeaud, M., 2013. Les couverts végétaux: gestion pratique de l'interculture. Éd. France Agricole.

White, R.E., 2006. Soils for Fine Wines. Oxford University Press.

Winkler, A.J., 1962. General Viticulture, By AJ Winkler. University of California Press.

Publications :

Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A., Hergert, G.W., 2015. Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. Agronomy Journal 107, 2449–2474. https://doi.org/10.2134/agronj15.0086

Carbonneau, A., 1985. The Early Selection of Grapevine Rootstocks for Resistance to Drought Conditions. Am J Enol Vitic. 36, 195–198.

Celette, F., Findeling, A., Gary, C., 2009. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. European Journal of Agronomy 30, 41–51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.07.003

Celette, F., Gaudin, R., Gary, C., 2008. Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. European Journal of Agronomy 29, 153–162. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007

Celette, F., Wery, J., Chantelot, E., Celette, J., Gary, C., 2005. Belowground Interactions in a Vine (Vitis vinifera L.)-tall Fescue (Festuca arundinacea Shreb.) Intercropping System: Water Relations and Growth. Plant Soil 276, 205–217. https://doi.org/10.1007/s11104-005-4415-5

Conradie, W., 1981. Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture: II. phosphorus, potassium, calcium and magnesium. South african journal of enology and viticulture 2, 7–13.

Costa, J.M., Vaz, M., Escalona, J., Egipto, R., Lopes, C., Medrano, H., Chaves, M.M., 2016. Modern viticulture in southern Europe: Vulnerabilities and strategies for adaptation to water scarcity. Agricultural Water Management 164, 5–18. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.021

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K.S., Le Bas, C., Justes, E., Léonard, J., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modelling & Software 64, 177–190. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024

Couëdel, A., Alletto, L., Justes, É., 2018. Crucifer-legume cover crop mixtures provide effective sulphate catch crop and sulphur green manure services. Plant Soil 426, 61–76. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3615-8

Crespy, A., 2003. Élements de réflexion sur la fertilisation de la vigne. Revue des oenologues et des techniques vitivinicoles et oenologiques: magazine trimestriel d'information professionnelle 30, 32–35.

Delas, J., Pouget, R., 1979. The influence of rootstock-scion relationships on the mineral nutrition of the vine and the consequences for fertilization. Soil in Mediterranean Type Climates and Their Yield Potential 289–299.

Deloire, A., Carbonneau, A., Wang, Z., Ojeda, H., 2004. Vine and water: a short review. OENO One 38, 1–13. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2004.38.1.932

Deloire, A., Ojeda, H., Zebic, O., Bernard, N., Hunter, J.J., Carbonneau, A., 2006. Influence de l'etat hydrique de la vigne sur le style de vin 12.

Delpuech, X., Metay, A., 2018. Adapting cover crop soil coverage to soil depth to limit competition for water in a Mediterranean vineyard. European Journal of Agronomy 97, 60–69. https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.013

Devaux, N., Crestey, T., Leroux, C., Tisseyre, B., 2019. Potential of Sentinel-2 satellite images to monitor vine fields grown at a territorial scale. OENO One 53. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.1.2293

Dubernet, M., Toussaint, M., Camper, P.-M., Paricaud, T., Coste, M., Prabonnaud, S., Thomas, G., Fil, J., Fourment, J.-D., Tregoat, O., 2015. Dynamique annuelle de la nutrition de la vigne et ses conséquences œnologiques : cas de l'Azote et du Potassium 8.

Eltom, M., Trought, M.C.T., Agnew, R., Parker, A., Winefield, C.S., 2017. Pre-budburst temperature influences the inner and outer arm morphology, phenology, flower number, fruitset, TSS accumulation and variability of *Vitis vinifera* L. Sauvignon Blanc bunches: Temperature and inflorescence development. Australian Journal of Grape and Wine Research 23, 280–286. https://doi.org/10.1111/ajgw.12260

Ferrero, A., Usowicz, B., Lipiec, J., 2005. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. Soil and Tillage Research 84, 127–138. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.003

Finney, D.M., White, C.M., Kaye, J.P., 2016. Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. Agronomy Journal 108, 39–52. https://doi.org/10.2134/agronj15.0182

Fourie, J.C., 2012. Soil Management in the Breede River Valley Wine Grape Region, South Africa. 4. Organic Matter and Macro-nutrient Content of a Medium-textured Soil. South African Journal of Enology and Viticulture 33, 105–114. https://doi.org/10.21548/33-1-1312

Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., Santos, J.A., 2018. Viticultural irrigation demands under climate change scenarios in Portugal. Agricultural Water Management 196, 66–74. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.023

Fuentes, S., Poblete-Echeverría, C., Ortega-Farias, S., Tyerman, S., De Bei, R., 2014. Automated estimation of leaf area index from grapevine canopies using cover photography, video and computational analysis methods: New automated canopy vigour monitoring tool. Australian Journal of Grape and Wine Research 20, 465–473. https://doi.org/10.1111/ajgw.12098

Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H., Metay, A., 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. Agriculture, Ecosystems & Environment 251, 158–170. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030

Gardner, W., Boundy, K., 1983. The acquisition of phosphorus by Lupinus albus L. IV. The effect of interplanting wheat and white lupin on the growth and mineral composition of the two species. Plant and Soil 391–402.

Gaudin, R., Celette, F., Gary, C., 2010. Contribution of runoff to incomplete off season soil water refilling in a Mediterranean vineyard. Agricultural Water Management 97, 1534–1540. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.007

Gaudin, R., Kansou, K., Payan, J.-C., Pellegrino, A., Gary, C., 2014. A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield. OENO One 48, 1.

https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.1.1655

Gontier, L., 2015. Engrais verts en viticulture: incidence du type de couvert végétal et de son mode de destruction sur l'alimentation azotée de la vigne. plus 16, 35.

Goulet, E., Dousset, S., Chaussod, R., Bartoli, F., Doledec, A.F., Andreux, F., 2006. Water-stable aggregates and organic matter pools in a calcareous vineyard soil under four soil-surface management systems. Soil Use and Management 20, 318–324. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00376.x

Ingels, C.A., Scow, K.M., Whisson, D.A., Drenovsky, R.E., 2005. Effects of Cover Crops on Grapevines, Yield, Juice Composition, Soil Microbial Ecology, and Gopher Activity. Am J Enol Vitic. 56, 19–29.

IPCC, W., 2013. Climate Change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC WGI. Accessed May 14, 2014.

Jensen, M.E., Haise, H.R., 1963. Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division 89, 15–41.

Kirkby, M.J., Le Bissonais, Y., Coulthard, T.J., Daroussin, J., McMahon, M.D., 2000. The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. Agriculture, Ecosystems & Environment 81, 125–135. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00186-9

Komárek, M., Čadková, E., Chrastný, V., Bordas, F., Bollinger, J.-C., 2010. Contamination of vineyard soils with fungicides: A review of environmental and toxicological aspects. Environment International 36, 138–151. https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.005

Lal, R., 2015. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. Sustainability 7, 5875–5895. https://doi.org/10.3390/su7055875

Leeuwen, C. van, Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., Gaudillère, J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? OENO One 43, 121–134. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798

Lempereur, V., Gautier, J., Herbin, C., 2017. Le guide de l'agroécologie en viticulture, un outil pour la filière, in: BIO Web of Conferences. EDP Sciences, p. 01007.

Leonard, J., Andrieux, P., 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. CATENA 32, 209–223. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00049-6

Lopes, C., Pinto, P., 2000. Estimation de la surface foliaire principale et secondaire d'un rameau de vigne. Progrès agricole et viticole 117, 160–166.

Martínez-Casasnovas, J.A., Sánchez-Bosch, I., 2000. Impact assessment of changes in land use/conservation practices on soil erosion in the Penedès–Anoia vineyard region (NE Spain). Soil and Tillage Research 57, 101–106.

Morlat, R., Jacquet, A., 2003. Grapevine Root System and Soil Characteristics in a Vineyard Maintained Long-term with or without Interrow Sward. American Journal of Enology and Viticulture 54.

Mpelasoka, B.S., Schachtman, D.P., Treeby, M.T., Thomas, M.R., 2003. A review of potassium nutrition in grapevines with special emphasis on berry accumulation. Australian Journal of Grape and Wine Research 9, 154–168. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2003.tb00265.x

Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., Deloire, A., 2002. Influence of Pre- and Postveraison Water Deficit on Synthesis and Concentration of Skin Phenolic Compounds during Berry Growth of Vitis vinifera cv. Shiraz. American Journal of Enology and Viticulture 53, 261–267.

Ovalle, C., del Pozo, A., Lavín, A., Hirzel, J., 2007. Cubiertas Vegetales en Viñedos: Comportamiento de mezclas de Leguminosas Forrajeras Anuales y Efectos sobre la Fertilidad del Suelo. Agric. Téc. 67. https://doi.org/10.4067/S0365-28072007000400006

Patrick, A., Smith, R., Keck, K., Berry, A., 2004. Grapevine uptake of 15N-labeled nitrogen derived from a winter annual leguminous cover crop mix. American Journal of Enology and Viticulture 55, 186–189.

Patrignani, A., Ochsner, T.E., 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. Agronomy Journal 107, 2312–2320. https://doi.org/10.2134/agronj15.0150

Penman, H.L., Keen, B.A., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193, 120–145. https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037

Pool, R.M., Dunst, R.M., Lakso, A.N., 1990. Comparison of Sod, Mulch, Cultivation, and Herbicide Floor Management Practices for Grape Production in Nonirrigated Vineyards. Journal of the American Society for Horticultural Science 115, 872–877. https://doi.org/10.21273/JASHS.115.6.872

Prosdocimi, M., Jordán, A., Tarolli, P., Keesstra, S., Novara, A., Cerdà, A., 2016. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. Science of The Total Environment 547, 323–330. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.076

Rouse Jr, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation.[Great Plains Corridor].

SCHALLER, K., 1999. L'influence des différents systèmes de labour du sol sur l'absorption de N, P, K, Mg, Ca et des composés organiques N par les baies du raisin pendant la croissance et le développement de la variété « Riesling blanc ». Bull. OIV 72, 603–629.

Scholander, P.F., Bradstreet, E.D., Hammel, H.T., Hemmingsen, E.A., 1966. Sap concentrations in halophytes and some other plants. Plant Physiology 41, 529–532.

Sprin, J.-L., Delabays, N., 2006. Essai d'enherbement de la vigne avec des espèces peu concurrentielles: aspects agronomiques. Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic. 38, 355–359.

Takeda, M., Nakamoto, T., Miyazawa, K., Murayama, T., Okada, H., 2009. Phosphorus availability and soil biological activity in an Andosol under compost application and winter cover cropping. Applied Soil Ecology 42, 86–95. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.02.003

Tan, S., Crabtree, G.D., 1990. Competition Between Perennial Ryegrass Sod and `Chardonnay' Wine Grapes for Mineral Nutrients. HortScience 25, 533–535. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.25.5.533

Thorup-Kristensen, K., Magid, J., Jensen, L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 227–302. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79005-6

Unger, P.W., Vigil, M.F., 1998. Cover crop effects on soil water relationships. Journal of Soil and Water Conservation 53, 200–207.

Valdés-Gómez, H., Gary, C., Cartolaro, P., Lolas-Caneo, M., Calonnec, A., 2011. Powdery mildew development is positively influenced by grapevine vegetative growth induced by different soil management strategies. Crop Protection 30, 1168–1177.

Van Leeuwen, C., Pieri, P., Gowdy, M., Ollat, N., Roby, J.-P., 2019. Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilence to drought in vineyards in a contexte of climate change. OENO One 53, 129–146. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2420

Van Leeuwen, C., Roby, J.-P., De Rességuier, L., 2018. Soil-related terroir factors: a review. OENO One 52, 173–188. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.2.2208

Vaudour, E., Costantini, E., Jones, G.V., Mocali, S., 2015. An overview of the recent approaches to terroir functional modelling, footprinting and zoning. SOIL 1, 287–312. https://doi.org/10.5194/soil-1-287-2015

Vrignon-Brenas, S., Celette, F., Piquet-Pissaloux, A., Jeuffroy, M.-H., David, C., 2016. Early assessment of ecological services provided by forage legumes in relay intercropping. European Journal of Agronomy 75, 89–98. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.011

Wassenaar, T., Andrieux, P., Baret, F., Robbez-Masson, J.M., 2005. Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. The case of vineyards in a Mediterranean area. CATENA, Surface characterisation for soil erosion forecasting 62, 94–110. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.004

Zhu, J., Fraysse, R., Trought, M.C.T., Raw, V., Yang, L., Greven, M., Martin, D., Agnew, R., 2020. Quantifying the seasonal variations in grapevine yield components based on pre- and post-flowering weather conditions. OENO One 54. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.2.2926

ANNEXES :

Annexe 1 : Caractérisation et aptitude de certains engrais verts (Adapté de “les engrais verts en cultures légumières 2
Annexe 2 : Analyse de sol de la parcelle à l’étude 3
Annexe 3 : analyse du compost apporté à la parcelle à l’étude en automne 2019 3
Annexe 4 : Limites de quantification et incertitude de mesures d’analyses de sol au laboratoire Dubernet 4
Annexe 5 : Corrélation entre la méthode de référence et la méthode PIR Foss pour la détermination de l’azote total dans les pétioles 4
Annexe 6 : Contrôle de maturité des modalités 4
Annexe 7 : Graphiques (en mg/100Pétioles) et résultats d’analyses pétiolaire (en %MS) 5
Annexe 8 : Vitesse moyenne d’élongation des rameaux par stade phénologique 9
Annexe 9 : Bilan hydrique avec comparaison aux mesures de potentiel hydrique foliaire de tige 9

Annexe 1 : Caractérisation et aptitude de certains engrais verts (Adapté de “les engrais verts en cultures légumières (synthèse bibliographique)” – Corinne Vantalon – APREL – Novembre 2000)

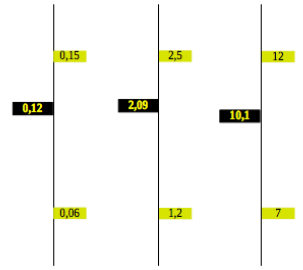
Légende : Pas d’action : o / Action intéressante : + / Action efficace : ++ / Action très efficace : +++

Famille	Nom commun	Effets attendus			Comportement				Rendement (Tmat.sèche /ha)	Éléments prélevés (kg/ha)		
		Restructuration du sol	Piège à nitrate	Lutte contre les adventices	Croissance	Repousses	Sensibilité au gel	Résistance à la sécheresse		N	P	K
POACEES (graminées)	Ray-grass italien	++	+	++	++	+++	-	+	3 à 8	10-60	10-30	10-120
	Ray-grass anglais	++	+	++	+++	++	-	-	3 à 8	10-60	10-30	10-120
	Seigle	+++		+	0	+++	-	+	3 à 8	30-50	10-20	40-50
BRASSICACEES (crucifères)	Moutarde blanche	++	++	+	+++	0	++ (-5°C)		3	40-90	15-50	60-160
	Navette fourragère	++	++		+++	+++	+		3 à 5	80-120	35-45	150-200
	Radis fourrager	++	++	++	++	++	-- (-10°C)		4 à 5	60-140	30-50	110-210
	Colza fourrager	++	++	+	++	++		--	4 à 9	50-110	30-60	60-170
PAPILLONACEES	Vesce commune			++	++	0	+	-	3 à 8	60-75	20-30	50-75
	Trèfle incarnat	+					++		4 à 6	30-60	10-20	40-70
										référence trèfle Ladino		
	Trèfle violet	+					++		5 à 8	30-60	10-20	40-70
										référence trèfle Ladino		
	Féverole	++		- si semée seule	++		++	-	5 à 8	10-100	15-40	20-120

Annexe 2 : Analyse de sol de la parcelle à l'étude

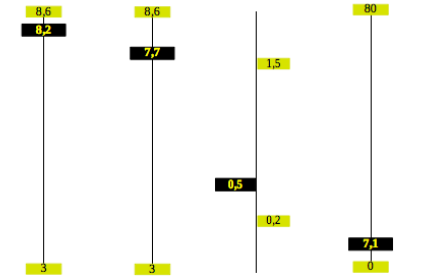
AZOTE ET CARBONE

N	MO	C/N
%	%	
0,12	2,09	10,1



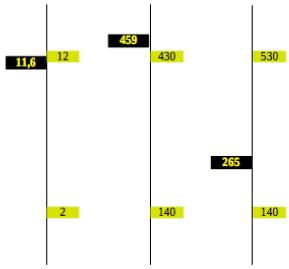
ACIDITÉ ET CALCAIRE

pHeau	pH KCl	pHeau – pH KCl	$CaCO_3$
			%
8,2	7,7	0,5	7,1



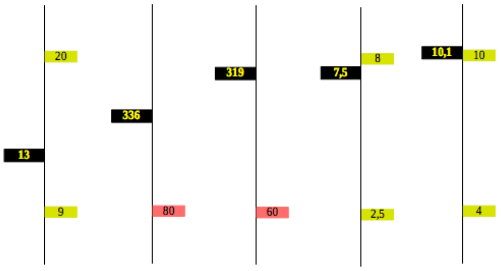
CATIONS MAJEURS ÉCHANGEABLES

CaO	K_2O	MgO
g/kg	mg/kg	mg/kg
11,6	459	265



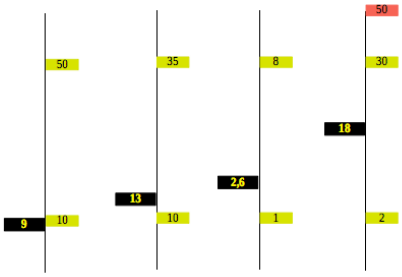
CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE

CEC	(K+Mg+Ca)/CEC	Ca/CEC	K/CEC	Mg/CEC
meq/100g	%	%	%	%
13,0	336	319	7,5	10,1



OLIGO-ÉLÉMENTS ÉCHANGEABLES

Fe EDTA	Mn EDTA	Zn EDTA	Cu EDTA
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
9	13	2,6	18



Annexe 3 : analyse du compost apporté à la parcelle à l'étude en automne 2019

RAPPORT D'ANALYSE DE FERTILISANT SOLIDE

IDENTIFICATION ECHANTILLON
Nom de l'échantillon : ENGRAIS VERT

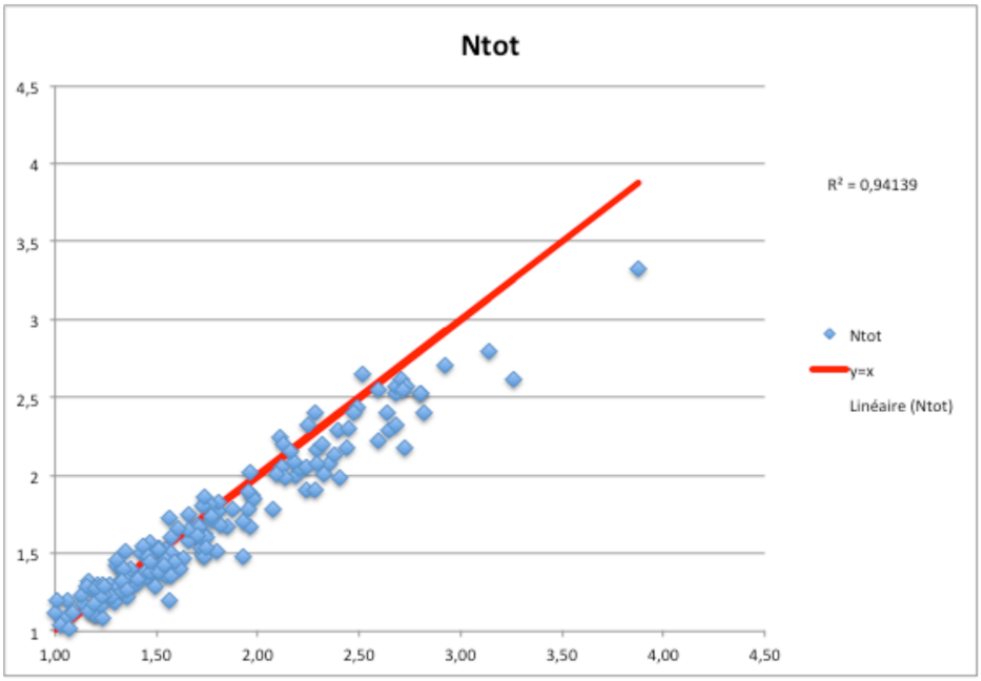
N° DOSSIER 19-31163
Date de réception: 13/12/2019
Date d'analyse: 13/12/2019
Date d'édition: 20/12/2019

Paramètre	Unité	Valeur sur sec	Valeur sur brut
pH	-		8,50
Taux d'humidité	%		31,3
Azote total	%	1,5	1,1
Carbone Total	%	23,3	16,0
Phosphore (P2O5)	%	0,5	0,4
Potassium (K2O)	%	1,7	1,2
Calcium (CaO)	%	11,8	8,1
Magnésium (MgO)	%	1,0	0,7
Sodium	g/kg	2,0	1,4
Fer	g/kg	7,4	5,1
Cuivre	mg/kg	70,0	48,1
Bore	mg/kg	23,4	16,1
Manganèse	mg/kg	210,0	144,3
Zinc	mg/kg	106,0	72,8
Rapport C/N	-	15,1	
Matière organique	%	46,5	31,9

Annexe 4 : Limites de quantification et incertitude de mesures d'analyses de sol au laboratoire Dubernet ; * *pour une prise d'essai de 2,5 g et un volume final de 25 mL*

Elément	Méthode	Limite de quantification*	Incertitude
Calcium	MP-AES	0,22 g/kg	21%
Cuivre		1 mg/kg	17%
Fer		6 mg/kg	24%
Potassium		40 mg/kg	22%
Magnésium		15 mg/kg	19%
Manganèse		15 mg/kg	22%
Zinc		1,5 mg/kg	21%

Annexe 5 : Corrélation entre la méthode de référence et la méthode PIR Foss pour la détermination de l'azote total dans les pétioles

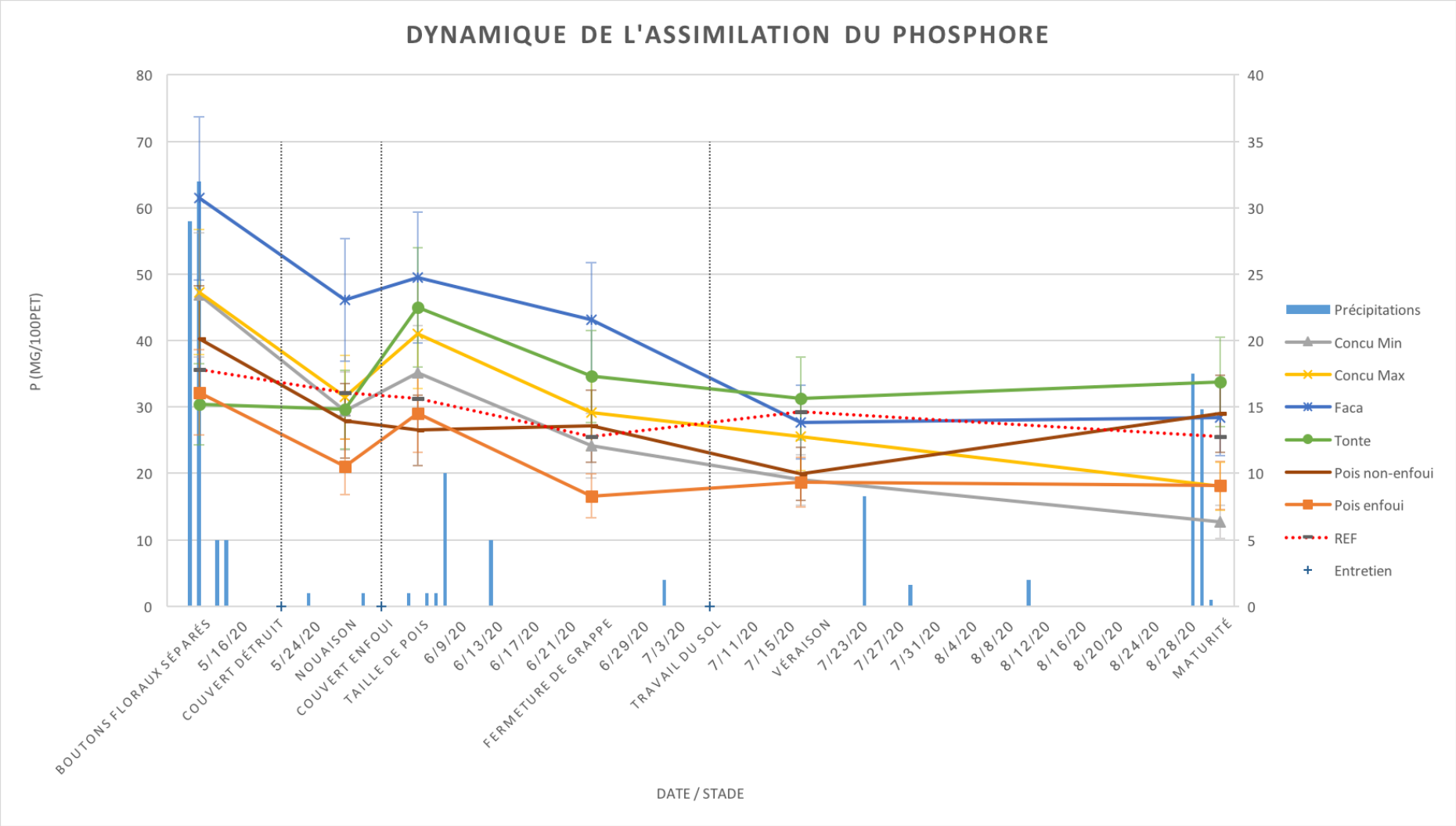


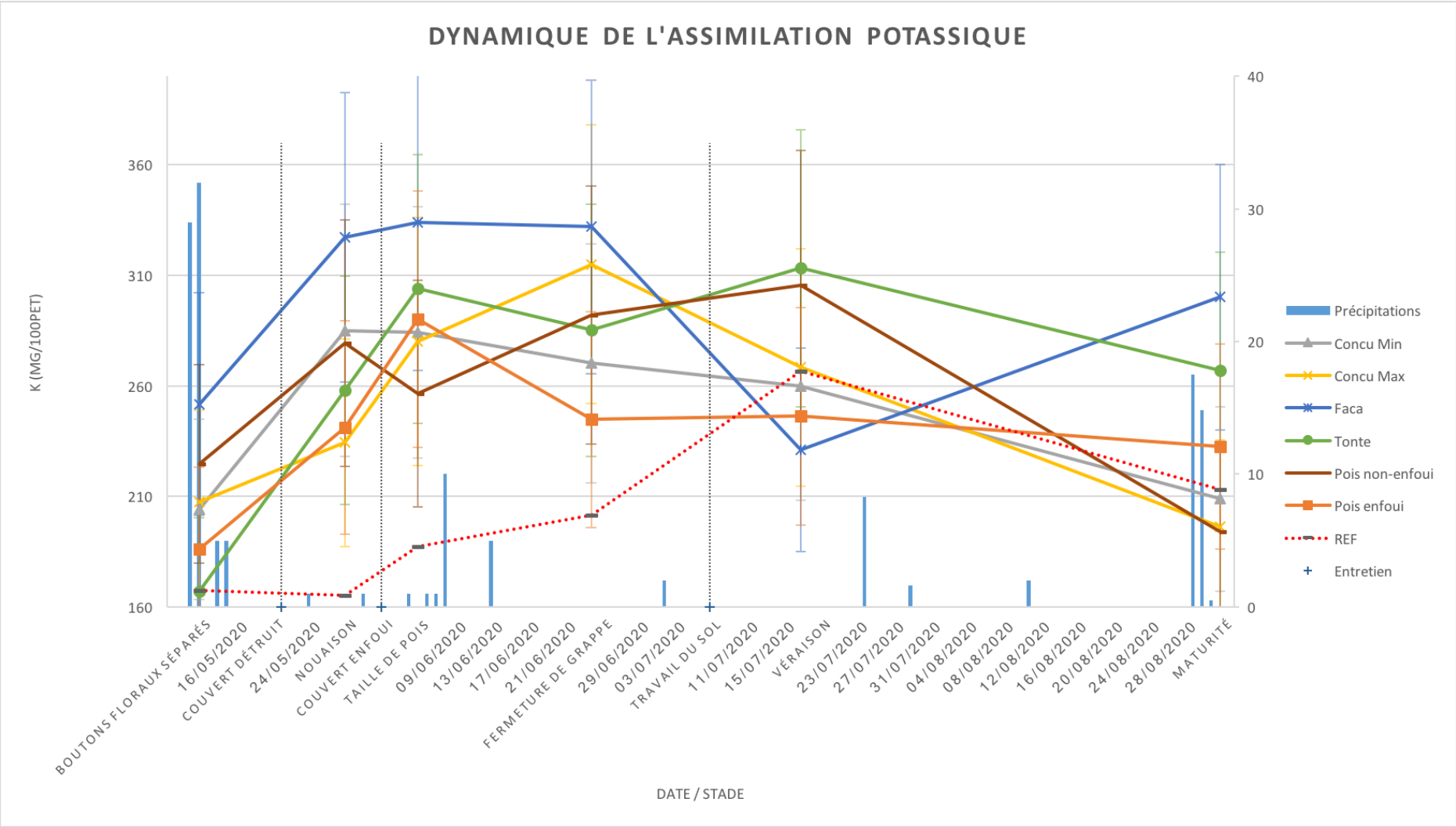
Annexe 6 : Contrôle de maturité des modalités

Sous-Dossier N°**1** — **CTMAT & BILAN MINERAL**

Référence	Informations		Glu+Fru g.L⁻¹	TAV % vol.	TAV Total IRTF br % vol.	TAV Total IRTF % vol.	TAV Total IRTF R % vol.	MV/F g.cm-3	AT g.L⁻¹ eq.H2SO4	pH	Ac.mal. g.L⁻¹	Ac.tart. g.L⁻¹	K/F mg.L⁻¹	AV g.L⁻¹ eq.H2SO4	Glyc. g.L⁻¹	Ac.gluc. g.L⁻¹	Citr/F g.L⁻¹	NOPA/F mg.L⁻¹	NH3/F mg.L⁻¹	N ASS mg.L⁻¹	DC13/F
Moût CM	N1	Syrah	242	0,00	15,03	14,38	13,83	1,103	3,98	3,41	1,6	6,7	1491	nd	≤ 0,3	nd	≤ 0,3	88	62	150	-23,80
Moût CM	N2	Syrah	208	0,00	12,92	12,36	11,89	1,089	4,44	3,33	1,4	8,0	1504	nd	nd	nd	≤ 0,3	86	63	149	-23,58
Moût CM	N3	Syrah	241	0,00	14,97	14,32	13,77	1,103	4,06	3,48	1,9	6,6	1667	nd	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	100	57	157	-23,93
Moût CM	N4	Syrah	239	0,00	14,84	14,20	13,66	1,102	4,41	3,41	1,8	7,2	1665	nd	0,4	0,4	≤ 0,3	96	56	152	-23,86
Moût CM	N5	Syrah	222	0,00	13,79	13,19	12,69	1,095	4,44	3,38	1,6	7,9	1571	nd	nd	nd	≤ 0,3	102	67	169	-23,78
Moût CM	N6	Syrah	241	0,00	14,97	14,32	13,77	1,104	4,58	3,41	1,8	7,5	1614	nd	0,5	0,4	≤ 0,3	101	59	160	-23,84

Annexe 7 : Graphiques (en mg/100Pétioles) et résultats d'analyses pétiolaire (en %MS)

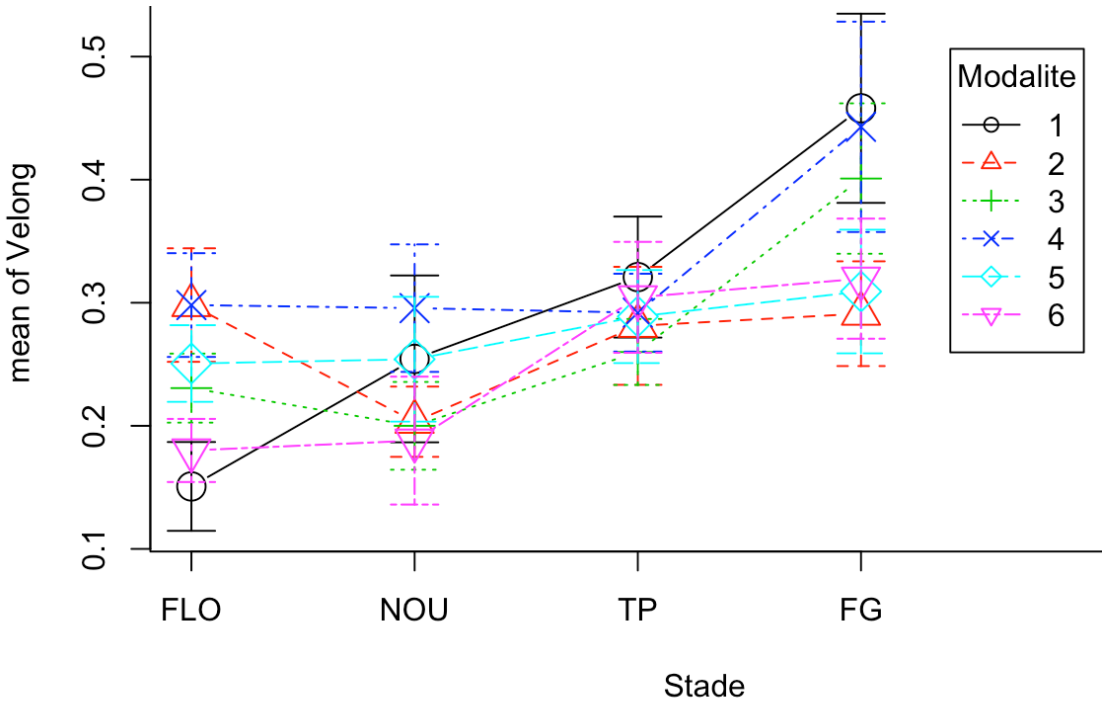



DYNAMIQUE DE L'ASSIMILATION POTASSIQUE
K (MG/100PET)
360
310
260
210
160
40
30
20
10
0
BOUTONS FLORAUX SÉPARÉS
16/05/2020
COUVERT DÉTRUIT
24/05/2020
NOUAISON
COUVERT ENFOUI
TAILLE DE POIS
09/06/2020
13/06/2020
17/06/2020
21/06/2020
FERMETURE DE GRAPPE
29/06/2020
03/07/2020
TRAVAIL DU SOL
11/07/2020
15/07/2020
VÉRAISON
23/07/2020
27/07/2020
31/07/2020
04/08/2020
08/08/2020
12/08/2020
16/08/2020
20/08/2020
24/08/2020
28/08/2020
MATURITÉ
DATE / STADE
Précipitations
Concu Min
Concu Max
Faca
Tonte
Pois non-enfoui
Pois enfoui
REF
Entretien

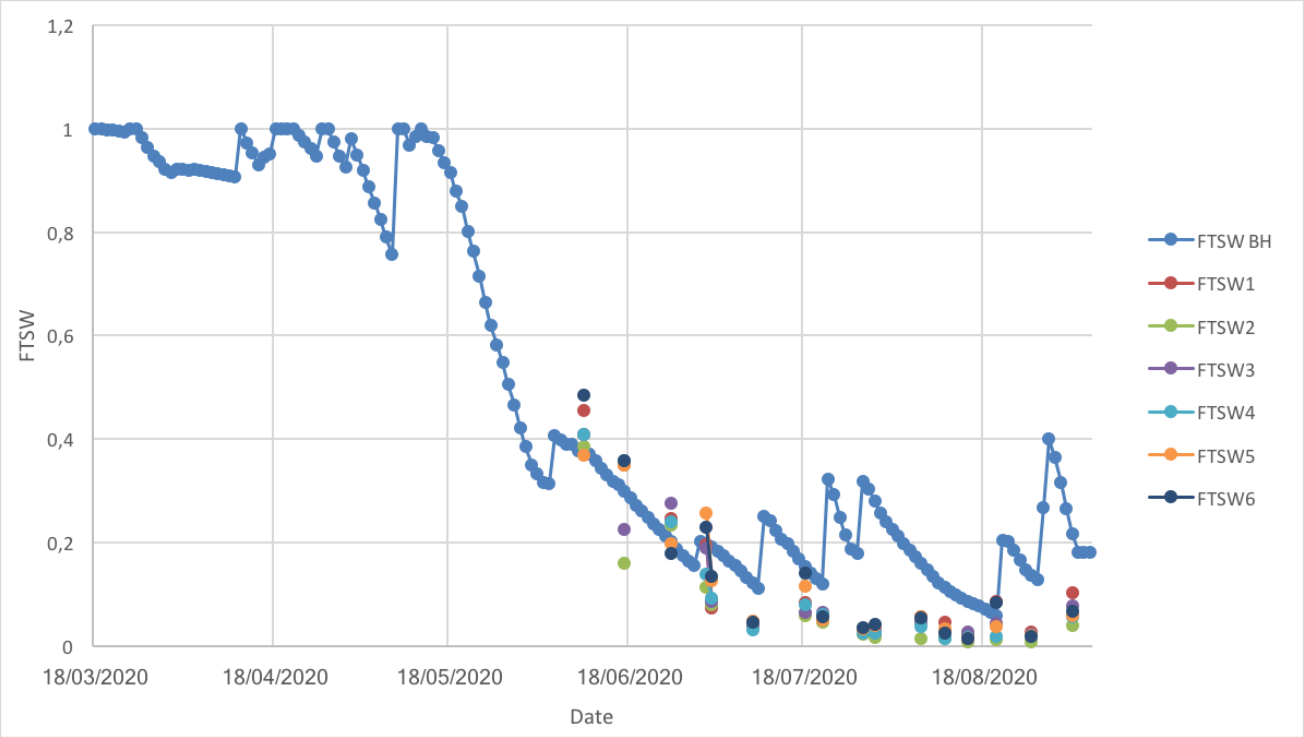
Modalité	Stade	Ntt	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B	PS	Nbre
1	BFS	2,36	0,69	3	1,5	0,4	724	81	26	19	33	51,6	3,4	50
2	BFS	2,37	0,73	3,2	1,5	0,4	538	41	21	22	31	50,1	3,5	54
3	BFS	2,2	0,83	3,4	1,6	0,4	544	40	19	22	35	51,8	3,7	50
4	BFS	2,15	0,51	2,8	1,5	0,3	603	36	23	19	27	50,3	3,1	52
5	BFS	2,07	0,52	3	1,5	0,3	842	31	24	19	31	53,5	3,1	50
6	BFS	2,37	0,61	3,4	1,6	0,3	416	34	25	22	29	55,6	3,5	53
1	NOU	1,17	0,33	3,2	1,8	0,5	636	27,3	26	98	27	60,6	4,9	55
2	NOU	1,09	0,39	2,9	1,8	0,5	623	26	25	96	26	59,3	4,2	52
3	NOU	1,02	0,48	3,4	2,1	0,6	564	35,8	22	84	30	57,7	5,1	53
4	NOU	1,1	0,39	3,4	1,9	0,5	672	27,7	27	94	27	61	4,1	54
5	NOU	1,05	0,27	3,1	1,7	0,5	641	31,9	26	86	23	60,1	4,2	54
6	NOU	1,02	0,33	3,3	2	0,5	626	28,1	30	65	27	59	4,4	52
1	TdP	1,22	0,36	2,9	2,2	0,6	774	33,1	32	186	28	62,9	4,9	50
2	TdP	1,17	0,41	2,8	2,1	0,6	672	27,6	26	168	27	59,8	5,4	54
3	TdP	1,04	0,46	3,1	2,1	0,6	561	22,3	23	113	28	54,1	5,6	52
4	TdP	1,15	0,46	3,1	2,2	0,6	719	27,8	25	162	27	58,3	5	51
5	TdP	1,09	0,29	2,9	2,3	0,6	656	27,2	28	152	29	60,9	5,1	51
6	TdP	1,16	0,3	2,9	2,1	0,6	634	23,6	37	147	29	60,8	4,6	52
1	FG	1,07	0,26	2,9	2,7	0,84	918	26	40	166	27	44,5	4,1	44
2	FG	1,02	0,26	2,8	2,8	0,75	775	24,3	40	155	26	41,4	5,4	48

3	FG	1,06	0,39	3	2,9	0,85	792	21,8	32	149	29	42,9	5,2	47
4	FG	0,97	0,34	2,8	3	0,83	888	23,5	40	158	28	43,1	5,4	53
5	FG	0,91	0,17	2,5	3,1	0,88	877	22,6	45	146	29	48,6	4,7	48
6	FG	0,89	0,26	2,8	3,2	0,99	878	19,8	49	134	29	50,7	4,9	47
1	VER	0,9	0,19	2,6	3,1	1,23	1017	26,3	45	119	33	34,7	5,2	52
2	VER	0,91	0,22	2,3	2,8	1,13	789	22,2	45	108	32	31,5	6,3	54
3	VER	0,92	0,24	2	3	1,18	803	22,8	44	106	39	32,9	6,7	58
4	VER	0,9	0,24	2,4	3,1	1,11	897	20,4	53	107	33	33,2	7,7	59
5	VER	1	0,16	2,1	3,2	1,2	852	23	43	139	33	34,2	6,8	58
6	VER	0,99	0,15	2,3	3,4	1,04	793	20	47	119	31	34,4	7,7	58
1	MAT	0,78	0,11	1,8	3,6	1,38	1099	23,8	50	56	39	30,1	5,8	50
2	MAT	0,73	0,12	1,3	3,5	1,49	1069	21,8	46	46	38	29,9	7,7	51
3	MAT	0,7	0,18	1,9	3,7	1,51	893	19,4	52	51	48	30,8	7,9	50
4	MAT	0,67	0,19	1,5	3,7	1,42	995	17,2	49	48	45	31	8,9	50
5	MAT	0,7	0,11	1,4	3,8	1,56	735	16,8	46	51	44	32,2	8,3	50
6	MAT	0,69	0,18	1,2	3,5	1,75	894	16,3	29	46	50	33,5	8,4	52

Annexe 8 : Vitesse moyenne d'élongation des rameaux par stade phénologique



Annexe 9 : Bilan hydrique avec comparaison aux mesures de potentiel hydrique foliaire de tige



Impact d'un couvert végétal et de son entretien sur l'assimilation des éléments minéraux par la vigne

Résumé : Les sols du vignoble Languedocien sont particulièrement pauvres en matière organique et sensibles à l'érosion. Le pilotage de la fertilisation dans cette région constitue donc un levier d'amélioration de ses potentialités. La mise en place d'un enherbement est une technique de conservation des sols qui offre de nombreux services agronomiques permettant de répondre en partie à ces problèmes de fertilité. Les stratégies d'enherbement et leur entretien sont multiples et conditionnent les services agronomiques obtenus.
Ce mémoire d'attache à étudier l'effet de différentes techniques d'entretien d'un couvert de légumineuses (enherbement total, sol nu, tonte, roulage) sur l'assimilation minérale de la vigne. La dynamique de restitution des éléments minéraux a été suivi par analyse pétiolaire tout au long du cycle. Ces analyses s'accompagnent de diverses mesures sur le fonctionnement physiologique des vignes (stress hydrique, canopée, vigueur…).
Les résultats ne montrent pas de différences significatives dans la nutrition des vignes entre les modalités mises en place, mais il confirme les observations faites sur les dynamiques de restitution et la concurrence hydro-azotée entre le couvert et la vigne.

Mots-clés : Nutrition, pétioles, enherbement, fertilisation

Legume cover-crop and soil management impact on vine nutrient uptake

Abstract : The *Languedoc's* vineyard faces agronomic issues such as organic matter loss and soil erosion. Service crop provides various services that can adress these issues. Those services are conditioned by the management of the cover-crop culture such as its date or its mode of destruction (mowing, *rolofaca*).
This study aims to better understand the impact of different management techniques on vine nutrient uptake. Those techniques ranged from bare soil to full cover, and the destruction was made either by mowing or by *rolofaca*.
The nutrient uptake was measured by petiolar analysis throughout the vine's cycle. Other fysiological behaviour were measured with canopy and vigor indicators.
The results showed no significant differences in nutrient uptake between modalities, but confirmed the assumptions made on the nutrient restitution and the competition for ressources.

Keywords : Nutrient-uptake, petiolar analysis, sustainable fertilisation

l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement

Montpellier SupAgro

2 place Pierre Viala, F 34060 MONTPELLIER cedex
http://www.supagro.fr
tél : +33(0)4 99 61 22 00